ZUR FRAGE DER GESTEINSVERWITTERUNG

(Über geochemische und mikrobiologische Bereiche
der exogenen Dynamik)

I N A U G U R A L - D I S S E R T A T I O N

zur Erlangung der Doktorwürde
der Hohen Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Julius-Maximilians-Universität in Würzburg

vorgelegt von
Wolfgang Krumbein, Würzburg

Würzburg, 1966

1967

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41544724_0023

ZUR FRAGE DER GESTEINSVERWITTERUNG

(Über geochemische und mikrobiologische Bereiche
der exogenen Dynamik)

I N A U G U R A L - D I S S E R T A T I O N

zur Erlangung der Doktorwürde
der Hohen Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Julius-Maximilians-Universität in Würzburg

vorgelegt von
Wolfgang Krumbein, Würzburg

Würzburg, 1966

Tag der Einreichung: 3. Nov. 1966

Tag der mündlichen Prüfung: 21. Dezember 1966

Berichterstatter: Prof. Dr. G. Knetsch

Mitberichterstatter: Prof.Dr.H.Seeliger

Promotion 31. Jan. 1967

INHALTSVERZEICHNIS

Seite

I. Einleitung.....1

II. Geomikrobiologische Problemstellung.....10

III. Probenauswahl und Probennahme.....14

IV. Die Gesteine.....16

V. Die Methoden.....19

A. Mikrobiologische Untersuchungsmethoden.....19

B. Physikalische Untersuchungsmethoden.....34

C. Chemische Untersuchungsmethoden.....34

VI. Beschreibung der Einzelproben (Ergebnisse der biologischen und chemischen Analysen im Beiheft).....38

VII. Diskussion der Ergebnisse.....67

A. Mikrobiologie im Verwitterungsbereich der untersuchten Bausteine.

1. Der Stickstoffkreislauf.....67

2. Der Schwefelkreislauf.....78

3. Flechten.....84

4. Algen.....85

5. Pilze.....86

6. Gesamtmikroflora und Verwitterungsversuche..89

B. pH-Wert und Redoxpotential.....97

C. Chemismus der untersuchten Proben.....99

VIII. Schutzmaßnahmen gegen die Gesteinsverwitterung...104

Literaturverzeichnis.....I

UNIVERSITEITSBIBLIOTHEEK - LEIDEN -

ZUSAMMENFASSUNG

Aus den biologischen und chemischen Analysen der untersuchten Gesteine und aus den Verwitterungsversuchen lassen sich folgende Ergebnisse herauslesen:

1. Zu Bauzwecken verwandte Gesteine beherbergen eine differenzierte Mikroflora, die in den starker verwitterten Partien - ohne daß sich echte Böden entwickeln- nahe an die Zahlenwerte einer normalen Bodenflora herankommt. Verschiebungen der Werte in den einzelnen physiologischen Gruppen kommen durch Materialunterschiede, Exposition etc. bedingt häufig vor.
2. Flechten und Algen wurden im Stadtgebiet in geringeren Mengen als außerhalb der Stadt beobachtet. Sie haben nur geringen Einfluß auf die Bausteinverwitterung.
3. Pilze und Aktinomyceten, die aus methodischen Gründen zusammen behandelt wurden, kamen in großen Zahlen vor. Sie beeinflussen mit Gewißheit die Verwitterung von Kalksteinen. Nach der zum Verwitterten hin zunehmenden Quantität und auf Grund der Eigenschaften ihrer Stoffwechselprodukte können sie auch die Sandsteinverwitterung beeinflussen.
4. Die Ammonifizierungskurven sowie die Mittelwerte der Gesamtmikroflora weisen darauf hin, daß die Mikroflora im Großstadtgebiet höhere Zahlen erreicht als in ländlichen Gemeinden oder im Steinbruch. Dies wird durch die speziellen Eigenschaften des Stadtklimas wie (a) höhere Temperaturen,(b) weniger extreme Milieuschwankungen und (c) hohe Zufuhr an organischem Material verursacht.
5. Oxydation von Stickstoff findet an Bausteinen in starkem Maße statt. Stickstoff oxydierende Keime beeinflussen mit Sicherheit die Verwitterung.

6. Stickstoffbindung findet nur in geringem Ausmaß statt. Die hierfür verantwortlichen Keime sind wahrscheinlich Anflugkeime, die sich auf dem Gestein nicht weiter entwickeln.
7. Oxydation von Schwefel durch Thiobacillen ließ sich sowohl auf Kalk- als auf Sandsteinen nachweisen. Die Keimzahlen erreichten Werte bis zu 10^6 Keime/g Trockenmaterial. Die autotrophen oxydierenden Keime haben einen gesicherten Einfluß auf die Verwitterung von Bausteinen. Der Schwefel als Energiequelle wird in seiner nicht völlig oxydierten Form aus der Luft oder gelegentlich aus dem Substrat bezogen.
8. Reduktion von Sulfaten und Mineralisation von organischen Schwefelverbindungen konnte nur in Einzelfällen nachgewiesen werden. Der Schwefelkreislauf in und auf Bausteinen ist demnach nicht geschlossen und es kommt zur Anreicherung von Sulfaten.
9. Reduktion von 3-wertigem Eisen wurde im Fall von 7 Proben nachgewiesen. In allen Proben, die untersucht wurden, überschritt die reduzierende Flora 10^3 Keime /g Trockenmaterial.
10. Keimzahlenmaxima traten im Stadtgebiet von Würzburg auf. Die niedrigsten Keimzahlen wurden an Steinbruchwänden festgestellt. Keime des Schwefelkreislaufes sind in der Stadt häufiger als in dünnbesiedelten Gebieten.
11. Die Entwicklung der Mikroflora auf einem Baustein in der Stadt konnte an einem Beispiel beobachtet werden. Die Mikroflora hat bereits nach 2 Monaten eine Besiedlungsdichte erreicht, die im Steinbruch selbst nach jahrelanger Exposition nicht erreicht wird.
12. Standortbedingungen haben für die Entwicklung der Mikroflora eine entscheidende Bedeutung. Bevorzugt sind Bauwerksteile,

die gegen starken Wind, Schlagregen und direkte Sonneneinstrahlung geschützt sind.

13. Eine quantitative Abgrenzung der biologischen und physikalisch-chemischen Verwitterung war nicht möglich, da (a) die Orte starker biologischer Aktivität und heftiger anorganischer Verwitterung häufig zusammenfallen und (b) die Laborbedingungen der Kulturversuche optimal für Mikroorganismen waren, während die Vorgänge in der Natur wahrscheinlich bedeutend langsamer ablaufen.

14. Der Einfluß der Mikroflora auf die Kalk- und Sandsteinverwitterung wurde im Laborversuch nachgewiesen.

15. Aus den chemischen Analysen geht hervor, daß die Elemente Na, K, Ca und Mg mit zunehmender Verwitterung in den leichtlöslichen Fraktionen angereichert werden. Bei Kalksteinen und Sandsteinen treten Nitrate und Sulfate als Mineralneubildungen auf. Nach allen in der Literatur erreichbaren Daten ist es sehr wahrscheinlich, daß die Umbildung der Feldspäte zu Tonmineralen durch die in großen Zahlen anwesende Mikroflora beeinflußt wird.

16. Die Zusammensetzung der Mikroflora wechselt von Kalken zu Sandsteinen insbesondere auf Grund der unterschiedlichen pH-Werte. Die Pilzflora entwickelt sich auf den sauren Sandsteinen bedeutend besser.

I

EINLEITUNG

Verwitterung ist ein Stoff- und Energieaustausch zwischen zwei offenen, heterogenen Systemen: Der Lithosphäre und der Atmosphäre. Beide Systeme sind durch Masse, Volumen, Druck, chemische Zusammensetzung, biologisch- biochemische Anteile, sowie durch die ihnen innewohnende Energie definiert.
Die gegenseitige Beeinflussung aller dieser Komponenten führt zu einer breiten Umwälzung des Ausgangsmaterials im Grenzbereich beider Systeme. Die natürliche Grenze dieser Vorgänge ist durch die Eindringtiefe von Lösungen, Gasen und Mikroorganismen in das Gestein definiert.
In vielen Fällen kann der Verwitterungsvorgang, wenn sich ein Gleichgewichtszustand zwischen beiden Systemen eingestellt hat, sich verlangsamen und zu einem Stillstand kommen. Er lebt jedoch häufig sofort wieder auf, wenn sich nur eine der die Verwitterung beeinflussenden Komponenten ändert.
Der menschliche Eingriff durch die Verwendung von natürlichen Gesteinen als Baustein führt in sehr vielen Fällen zu einer Belebung der Verwitterung, die im natürlichen Aufschluß zu einem Stillstand gekommen sein mag.
Die Vielzahl der beteiligten Faktoren bedingt, daß diese exogene Dynamik ein äußerst komplexes Arbeitsgebiet ist, zu dessen Bearbeitung die verschiedensten Methoden herangezogen werden müssen.
Die vorliegende Untersuchung beschäftigt sich vor allem mit der geochemischen und mikrobiologischen Beeinflussung von Bausteinen. Hinzugezogen wurde Material aus Stein-

brichen der näheren Umgebung.
Eine Betrachtung der Abbauvorgange im Boden wurde nicht durchgeführt.
Zu Beginn sei eine kurze Übersicht der Faktoren gemacht, die einen Baustein oder eine nackte Felswand beinflussen können.

A.) PHYSIKALISCHE BEDINGUNGEN

Man kann einen Gesteinskörper als ein offenes, thermodynamisches System sehen, das in Wechselbeziehungen zu einem ebenso offenen System - dem Klima- steht.
Von Großklimazonen abgesehen, wird der Klimaeinfluß durch die Verschiedenheit von Stadt- und Landklima, sowie durch das gesteinsnahe Mikroklima modifiziert. In engem Zusammenhang mit den Beeinflussungen durch das Mikroklima stehen edaphische Bedingungen nach KAISER (1928 u.1929). "Edaphisch bedingte geologische Vorgänge und Erscheinungen sind diejenigen, welche durch das Untergrundgestein selbst, sein Gefüge oder seinen Lagerungsverband so beeinflußt sind, daß sie von dem für das betreffende Gebiet allgemeingultigen abweichen" (KAISER, 1928).
Ein Gestein steht also in enger Beziehung zum Klima. Es nimmt Wasser auf und gibt es wieder ab. Es speichert Wärme und strahlt Wärme ab. Allein diese Faktoren können schon zu erheblichen Anderungen in Form und Stoffbestand führen. Temperatur, Regen und Wind sind zum Teil makroklimatische Einflusse, die durch kleinraumige Vorgange verstarkt werden können, die wir heute unter dem Begriff "Mikroklima" zu-

sammenfassen.(GEIGER, 1950). Die mm-mächtige Luftschicht an der Grenze zu einem Gesteinskörper unterliegt völlig anderen Bedingungen als die höheren Luftschichten. Dieser Bereich ist stark edaphisch beeinflußt.
Temperatur und Feuchtigkeit sind durch Wärmerückstrahlung, Wärmereflexion und Weiterleitung in einer geringmächtigen Zone stark modifiziert. Es kann an entsprechenden Bauwerksteilen zu Klimabedingungen kommen, die bei Anwendung einer großräumigen Klimabetrachtung als Wüstenklima angesehen werden müßten.
Die Feuchtigkeit ist an Steinmauern äußerst variabel. Bei bereits angegriffenen Steinen, die eine Kruste entwickelt haben, kann die feuchtigkeitsaktivste Zone sich weiter nach innen verlagern. Besonders ausgeprägt sind die Einflüsse der Feuchtigkeit an den Kapillarsäumen, die an Bauwerken durch aufsteigendes und absteigendes Wasser entstehen können. Der Feuchtigkeitshaushalt einzelner Regionen eines Bauwerks ist selbstverständlich äußerst wichtig für die gesteinsbewohnende Mikroflora.
Die mikroklimatischen und edaphischen Bedingungen beeinflussen weiterhin sehr stark die physiko-chemische Verwitterung.
Während die rein metereologischen Komponenten des Stadtklimas sich nur geringfügig von denkbaren Spezialklimabereichen außerhalb einer Großsiedlung unterscheiden, bewirken gerade edaphische (aklimatische oder mikroklimatische) Einflüsse eine erhebliche Modifizierung der Verhältnisse (KRAFZER, 1956).
(1) Die große Staubmenge in und über einer Großsiedlung zu der vor allem Verbrennungsrückstände beitragen, bewirkt starke Modifizierungen. Staub, Aschenteile und andere Ionen-

ballungen führen zu Wasserkondensation, zu größerer Aufheizung der Luft und zu einer stärkeren Wärmediffusion. Bauwerks-und Straßendeckenrückstranlungen heizen die Luft zusätzlich auf. Hierdurch werden Einflüsse wie Windexposition direkte Sonnenstranlung und Schlagregen stellenweise gemindert.

(2) Der Gehalt der Stadtluft an Chemikalien ist bedeutend höher als außerhalb von Großsiedlungen.

(3) Die Ionenballungen in der Großstadtluft sind Konzentrationskerne für organische Verbindungen, die mit dem Staub auf den Gesteinsflächen abgelagert werden und Energiequellen für heterotrophe Keime bieten. Aus diesem Punkt ergeben sich Folgerungen für die Mikrobiologie der Stadtluft und der beeinflußten Bauwerke.(MOLISCH, 1917; PICHLER, 1917).

Weitere rein physikalische Verwitterungsursachen liegen im Gestein selber. Porosität (scheinbare u. echte), Permeabilität, Beschaffenheit des Bindemittels, tektonische Geschichte, Entlastungsvorgänge durch Bearbeitung, mineralogische Beschaffenheit und Verfestigungsgrad haben einen Einfluß auf die Verwitterungsgeschwindigkeit (KIESLINGER, 1932 ; KNETSCH, 1952, 1955 u. 1960).

B.) PHYSIKO- CHEMISCHE BEDINGUNGEN:

An dieser Stelle sei nur kurz auf die möglichen und belegten Verwitterungseinflüsse physiko- chemischer Art hingewiesen, die z.T. sehr gut bearbeitet sind(BLANCK u. RIESER,1926; BLANCK u. PASSARGE,1925; KAISER,1928 etc.; KIESLINGER,1931-1959; MORTENSEN, 1902 - 1956; GOLDICH, 1938; KNETSCH, 1937-1960; KESSLER,1960; DE QUERVAIN, 1931 u. 1938; SCHMÖLZER,

1936; WILHELMY, 1959).
Für alle Vorgänge physiko-chemischer Art in einem Gestein und an seiner Oberfläche spielt die klimatisch (mikroklimatisch) bedingte Wärmebilanz, sowie die ebenfalls klimatisch; aber auch gesteinsbedingte Wasserführung eine große Rolle.
Also: Regen, Tau, Verdunstung, Kondensation, Kapillarität, Diffusion und Osmose.
Hierher gehören Erscheinungen wie Kapillarsäume, Salzausblühungen an und unter der Oberfläche (Efflorescenzen und Subflorescenzen) und Korrosion durch aktive Salzlösungen.

Wir können physikalisch-chemische Angriffe auf ein Gestein durch folgende Faktoren annehmen:
1. Durch den Sauregenalt der Luft (CO_2, NO_3, SO_3, PO_4 etc.)
Der Einfluß der Kohlensäure ist äußerst gering, ebenso ist der Sulfitgenalt allein noch keine Erklärung für Verwitterung, da in verwitternden Gesteinen fast nie Sulfit nachgewiesen werden konnte (KAISER,1929; KIESLINGER, 1932 u. KESSLER,1960).

2. Durch die im Gestein zirkulierenden sauren Lösungen, die dem Gestein selber, dem Boden oder Schutt entstammen können. Hierbei können auch organische Säuren beteiligt sein.

3. Wichtiger als diese aktiven Lösungsvorgänge sind jedoch die vieldiskutierten Bedingungen bei der Aus- und Umkristallisation von Alkali- und Erdalkalisalzen. Aus der sehr umfangreichen Literatur läßt sich für unser Gebiet (humides und Stadtklima) folgendes ableiten:
Lösungsfronten durch Wassersättigungs- und Temperaturgefalle können bei speziellen mikroklimatischen und edaphischen Bedingungen auftreten.
Umkristallisationen der Minerale der Erdalkali- und Alkali-

reihe, vor allem Hydratisation können in Temperaturbereichen zwischen $-5^{\circ}C$ und $+ 63^{\circ}C$ zu Volumenänderungen bis zu 300% führen (SCHMÖLZER,1936).
Temperaturen von $55^{\circ}C$ und tägliche Schwankungen bis zu $30^{\circ}C$ sind in den obersten Partien der Gesteine keine Seltenheit und kommen viel häufiger vor, als sich nach der Großwetterlage annehmen läßt. JAAG (1945) hat eine Reihe von eigenen Messungen und Meßdaten anderer Autoren dazu zusammengestellt.

Der unmittelbare "Kristallisationsdruck" von Mineralneubildungen tritt gegenüber der Umkristallisation zurück. Immerhin ist bekannt, daß ein Mineral durch die beim Wachstum auftretenden Oberflächenerscheinungen mindestens sein eigenes Gewicht heben kann. KIESLINGER (1933) diskutiert ausführlich diese Frage.
Neben physiko-chemischen Verwitterungsvorgängen spielen auch organo-chemische und biochemische Prozesse eine Rolle bei der Gesteinsverwitterung. Diese werden im Zusammenhang mit den biologischen Faktoren erwähnt.

C.) BIOLOGISCHE BEDINGUNGEN:

(1) Makrovegetation : Schädlichen Einfluß hat in den allermeisten Fällen eine dichte Pflanzendecke, sowie in Spalten und Mauerfugen eindringende Wurzeln und Äste.
Wurzeln scheiden in vielen Fällen agressive Stoffwechselprodukte aus, die Korrosionen verursachen. Auch haftende Rankengewächse haben entgegen der vielfach vertretenen Meinung eher eine zerstörende als schützende Wirkung. Ausführlich beschrieben werden solche Erscheinungen durch KIESLINGER (1932) und DELVERT (1962).

(2) Algen und Flechten: Algen- und Flechtenbewuchs ist auf

Gesteinen derart häufig und augenfällig, daß ihr Einfluß in vielen Fällen überbewertet wurde. Beide sind stark abhängig vom Mikroklima und edaphischen Bedingungen. Das Nährstoffangebot spielt eine untergeordnete Rolle, jedoch gibt es gelegentlich Flechtenbeobachtungen, die auf an Klüften ausgeschiedenen Mineralen konzentriert sind. Der Algenbewuchs des nackten Gesteines, seine Ökologie und sein Einfluß auf die Verwitterung wird in einer Monographie von JAAG (1945) behandelt.

Verwitterungserscheinungen durch Flechten werden selten geschildert. Es kommt gelegentlich zur Entwicklung eines "Mikrobodens" (Microsol nach DELVERT, 1962) dessen Mächtigkeit von der Art abhängig sein kann, der aber selten mehr als 1/4 bis 1 mm Mächtigkeit erreicht.

Ausgesprochene Verwitterung durch Flechten wird seltener beobachtet als eine gewisse Schutzwirkung, die dem dichten Belag zukommt. Algen und Flechten können, wenn sie gehäuft auftreten, einen feuchtigkeits- und temperaturregelnden Belag bilden, der vor physiko-chemischer Verwitterung durch Milderung des extremen Mikroklimas schützen kann (DELVERT, 1962 KIESLINGER, 1932 u. JAAG, 1945).

DELVERT (1962) in seiner Untersuchung über die Tempel von Angkor kommt zu dem Schluß, daß der Algenbelag an manchen Wänden die Krustenbildung verhinderte und so eine intensivere Verwitterung des Gesteines unterband.

Die Pflanzen absorbieren den Wasserüberschuß und verhindern ein völliges Austrocknen des Gesteins, sodaß ein verwitterungsfeindliches Edaphon der Gesteinsoberfläche resultiert.

Man kann also an manchen Stellen den Algen- und Flechtenbewuchs als Schutzrinde bezeichnen.

(3) Pilze und Bakterien: Pilze und Bakterien können auf verschiedene Weise und in verschieden starkem Maße zur Verwitterung von Gesteinen beitragen.
Lösungen können durch von Mikroorganismen ausgeschiedene Stoffwechselprodukte, sowie durch aktiven Austausch von Ionen bewirkt werden.
Möglich sind Auswirkungen von:
a) CO_3, NO_3, PO_4, SO_4 als biologisch entstandene, anorganische Radikale, die besser auf das Gestein einwirken können, als die gleichen Radikale aus der Luft, da sie punktförmig konzentriert direkt an der Mineraloberfläche entstehen.
b) organischen Säuren wie Essigsäure, Milchsäure, Buttersäure, andere Fettsäuren und sogar Nukleinsäuren als Stoffwechselprodukte der heterotrophen und autotrophen Mikroorganismen.
c) Enzymen, die auch nach dem Absterben der Organismen noch wirksam bleiben (Rapports du Colloque des 4 et 5 février 1965 de Microbiologie du Sol. Ann. Inst. Pasteur 1965).
Die freien Enzyme und höherorganisierten organischen Verbindungen sind häufig an im Gestein vorhandene Tonkolloide gebunden (CARROL, 1958; DEGENS, 1965).
MANDL u. GRAUER (1952, 1953) untersuchten eine Vielzahl von organischen Verbindungen, die z.T. mikrobiologisch entstehen können, auf ihre Fähigkeit, Minerale lösen zu können.
Dazu gehören unter anderem die Intermediärprodukte des Zuckerabbaues, auf deren Bedeutung für die Verwitterung von Gesteinen ebenfalls WEBLEY u. DUFF (1960) hinweisen.
Schließlich können Pilze und Algen zu Veränderungen an Mineralen durch aktive Aufnahme von Ionen führen (HEINEN, 1960-65; WEBLEY u. DUFF, 1960).

Aus diesem kurzen Überblick über mögliche Einflüsse, die eine Zerstörung von Mineralen und Gesteinen herbeiführen können, geht hervor, daß eine Vielzahl von Komponenten beteiligt ist, deren quantitativer Anteil nur sehr schwer festzulegen ist.

II

GEOMIKROBIOLOGISCHE PROBLEMSTELLUNG

Der Stoff- und Energieaustausch eines Gesteines wurde lange Zeit vor allem mechanisch und physiko-chemisch gesehen, wenngleich einige Autoren auf einen möglichen Einfluß von organischen Faktoren hinwiesen.

Man klammerte weiter den Prozeß der Bodenbildung aus dem Bereich der Gesteinsverwitterung aus. Die Bodenkunde löste sich schon früh aus dem Bereich der Geologie, hat ihre Wurzeln sogar z. T. in der chemischen Landwirtschaftslehre von LIEBIG.

Während die Bodenkunde schon früh die Bedeutung der Mikroorganismen für die Aufbereitung des Bodens erkannte, blieben Arbeiten mikrobiologischer Art auf dem geologischen Sektor sehr vereinzelt und wurden in ihrer Bedeutung von den Geologen unterschätzt oder nicht berücksichtigt.

BASSALIK (1913) machte als erster gezielte Verwitterungsversuche an Gesteinen mit aus Regenwurmern isolierten Mikroorganismen. Er wies nach, daß bakteriell gebildete Säuren, darunter vor allem die Kohlensäure, fähig sind,Gesteinsoberflächen zu ätzen und anzulösen.

Nach der Entdeckung der autotrophen Stickstoffoxydanten durch WINOGRADSKI (1891) und der autotrophen Schwefeloxydanten durch BEIJERINCK (1904) vergingen noch 30 Jahre ehe sich ISACENKO (1930) mit dem Problem der Verwitterung durch autotrophe Mikroorganismen beschäftigte.

ISACENKO (1930) und PARKER (1947- 1953),POCHON (1949- 1964), und KAUFFMANN (1952) wiesen in Einzelfällen nach, daß Bakterien dieser Gruppen imstande sind, durch Säurebildung

Gesteinselemente zu lösen und zerstörend zu wirken. KRUMBEIN u.POCHON (1964) zeigen, daß im Falle eines Kalksandsteines das karbonatische Bindemittel nahezu quantitativ in Gips umgesetzt wird. BLÖCHLIGER (1931) untersuchte die Mikroflora der Schweizer Kalkalpen und versuchte einzelne physiologische Aktivitäten herauszustellen, allerdings vor allem bei den heterotrophen Mikroorganismen. Er bezog in seine Untersuchungen auch Spaltenfüllungen mit Boden und die Mikroflora der dichten Algenrasen mit ein. Hierdurch sind einige der angegebenen Werte nicht als Werte für ein nacktes Gestein anzusehen. Im Falle der Bakterienflora auf algenbesetztem Gestein handelte es sich einwandfrei um eine Sekundärflora (JAAG, 1945).

PAINE u. LINGOOD (1933) untersuchten die Mikroflora von Gesteinen im Gebiet von London und in Steinbrüchen, machen aber keine genaueren Angaben über die Untersuchungsmethoden. RIPPEL-BALDES u. WITTMANN (1958) arbeiten über Lösungsvorgänge an Mineralen und betonen in ihrer Arbeit den Einfluß bakterieller Schleime auf die Minerale. Die Schleimhülle vieler Bakterien besteht aus Polysacchariden. Es kommen allerdings auch Polypeptide und z.B. im Fall von Azotobacter Zellulose vor. WEBLEY u. DUFF (1960) zeigen ,daß Lösungsvorgänge an Gesteinen oft durch Zwischenprodukte des Kohlenhydratabbaues bewirkt werden. In die gleiche Richtung weisen auch die Versuche von MANDL u.GRAUER(1952,1953).

Diese Arbeiten wurden zum größten Teil durch Mikrobiologen und Bodenmikrobiologen durchgeführt und gelangten nicht immer zur Kenntnis geologischer Autoren, die sich mit dem Problem der Verwitterung befaßten.

SCHWARTZ u.MÜLLER (1953) und KUZNETSOV et al.(1962) weisen in zusammenfassenden Arbeiten auf den Begriff "Geomikrobiologie" als ein neues Arbeitsgebiet hin, das unmittelbar mit Geologie und Mineralogie zusammenhängt. Unter diesem Begriff werden Arbeiten zusammengefaßt, die sich mit dem Einfluß von Mikroorganismen auf den exogenen Kreislauf (Sedimentation, Diagenese, Verwitterung) beziehen, sowie auf Hydrogeologie, Erdölgeologie und Lagerstättenkunde.
In der vorliegenden Arbeit sollte versucht werden, einen Überblick über die Ökologie der Mikroflora von Bausteinen zu gewinnen.
Jede Verwitterung, auch wenn sie an Bausteinen stattfindet, kann als ein Ansatz zur Bodenbildung aufgefaßt werden. Darum sollten die typischen hiesigen Gesteine mit bodenmikrobiologischen Methoden untersucht werden. Die Bodenmikrobiologie arbeitet häufig nicht über die Isolierung genau definierter Organismen, sondern versucht, alle vorhandenen Keime in Gruppen gleicher physiologischer und biochemischer Aktivität zu erfassen. Es wurden selektive Nährböden entwickelt, die es ermöglichen, Anhaltspunkte für eine Reihe von physiologischen Vorgängen im Boden (oder im Gestein) zu ermitteln.
Eine moderne mikrobiologische Bodenanalyse umfaßt im allgemeinen neben chemischen Analysen Keimzahlbestimmungen der folgenden Gruppen (POCHON u.TARDIEUX,1964):
Bestimmung der Gesamtkeimzahl, der Aktinomyceten, der Pilze, der Algen und gelegentlich Protozoen.
Aus dem Kreislauf des Stickstoffs werden die N_2-fixierenden, die proteolytischen, ammonifizierenden, nitrifizierenden

und denitrifizierenden Keime bestimmt.
Aus dem Kohlenstoffkreislauf werden folgende Keime bestimmt: Amylolytische, pektinolytische, hemicellulolytische und cellulolytische Keime. Die einzelnen Zucker werden im allgemeinen nicht überprüft, da sie selten rein im Boden vorliegen. Bei isolierten Stämmen wird selbstverständlich auch die Fähigkeit, spezielle Zucker abzubauen, überprüft.
In vielen Fällen werden die Keimgruppen des Schwefelkreislaufes erfaßt, mit Ausnahme der Bakterien, die fast nur im Wasser vorkommen. In Einzelfällen prüft man auf die Verwendbarkeit schwerlöslicher Phosphate.
Über den Phosphatkreislauf gibt es eine umfangreiche Spezialliteratur, er wurde jedoch wegen des relativ großen Aufwandes bei geringer Aussagekraft für die Verwitterung in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt.
Die Keime, die aktiv in den Kohlenstoffkreislauf eingreifen, wurden ebenfalls nicht gesondert bestimmt.
Es sollten in dieser Untersuchung möglichst viele Daten über die Mikroflora gesammelt werden, die einen Einfluß auf das Gestein ausüben könnte. Es sollte festgestellt werden, ob das Stadtklima die Besiedlung der Gesteine beeinflußt. Von größerem Interesse waren auch Standortfragen und mikroklimatische Einflüsse.
Schließlich sollte untersucht werden, ob ein Zusammenhang zwischen der Mikroflora und dem Chemismus eines verwitternden Gesteines besteht.

III

PROBENAUSWAHL UND PROBENNAHME

Die Zahl der zu untersuchenden Proben war leider durch die große Zahl von Einzeldaten, die von jeder Probe gesammelt werden sollten, beschränkt.
In einigen Fallen wurde auf Teile der chemischen Analyse verzichtet, da es nicht moglich war, genügend Material zu entnehmen.
Es wurden Gesteinsproben aus folgenden Gebieten entnommen:

A 1) Bauwerke in Würzburg (Muschelkalk, Werksandstein und Buntsandstein)
2) natürliche Aufschlüsse im Stadtgebiet (Muschelkalk)

B 1) Bauwerke aus den umliegenden kleineren Gemeinden (Muschelkalk, Werksandstein und Buntsandstein)
2) natürliche Aufschlüsse weitab von Siedlungen und Industrieanlagen (Werksandstein)

Im allgemeinen wurden Proben an Stellen genommen, die deutliche, mit dem bloßen Auge sichtbare Verwitterungserscheinungen zeigten. Dem Anschein nach völlig unverwitterte Probepunkte wurden nur zu Vergleichszwecken untersucht. Proben, die einem ausgepragten Kapillarsaum entstammten, wurden nur in wenigen Fällen verwendet, obwohl hier oft die stärksten, allerdings vorwiegend anorganischen Verwitterungsspuren zu finden sind.
Schon bei der Suche nach geeigneten Lokalitäten zur Entnahme von Material ließ sich feststellen, daß angegriffene Gesteine in Würzburg häufiger sind,als in den umliegenden kleineren Dörfern.

Etwa 60% der Proben wurden in Würzburg entnommen. Der Rest

in Versbach, Veitshöchnheim, Thüngersheim, Steinbach, Marktbreit, Iphofen und Büchold sowie aus Steinbrüchen der Gegend um Obernbreit.

Die sichtbar verwitterten Partien des gewählten Steines wurden mit einem sterilen Skalpell in einen sterilen Behälter gebracht. Dann wurde die Gesteinsoberfläche solange gesäubert, bis haltbares, makroskopisch noch unverwittertes Material anstand und dieses mit einem sterilen Hammer entnommen. War das unverwitterte Stück zu groß für einen Glaskolben so wurde es in sterile Aluminiumfolie gewickelt.

Die noch fest zusammenhängenden Stucke wurden im Labor an der Bunsenflamme vor der Weiterverarbeitung abgeflammt, um Oberflächenkeime zu entfernen.

Die mikrobiologische Untersuchung wurde möglichst am selben Tag, in keinem Fall spater als drei Tage nach der Probennahme begonnen, um eine Veränderung in vitro zu vermeiden.

Die eingebrachten Proben wurden bis zur Verarbeitung im Kühlschrank (ca. 4-7°C)aufbewahrt.

Im Gelände wurden ,soweit möglich,Daten über die Erbauung des Gebäudes ,seine Wetterexposition, seine Umgebung und sein allgemeines Aussehen gesammelt. Es wurde immer Augenmerk auf die mit dem bloßen Auge sichtbare Flora gelegt.

Es wurde ebenfalls versucht,menschliche Einflusse, die längere Zeit nach der Erbauung stattfanden,zu ermitteln.

IV

DIE GESTEINE

Da die Untersuchung mit einer Ausnahme auf das Unterfränkische Gebiet beschränkt blieb, kamen als Gesteine hauptsächlich Buntsandstein, Werksandstein und Muschelkalk in Frage. Diese Gesteine sind petrographisch und stratigraphisch gut untersucht. Es ist deshalb nicht nötig, auf diese Fragen ausführlicher einzugehen. KESSLER (1960) wertete auch Dünnschliffe der verwitternden Sandsteine aus. Er verwendete außerdem Röntgenanalysen der betreffenden Gesteine.

A.) BUNTSANDSTEIN

Der in Würzburg und Umgebung für Bauwerke verwendete Buntsandstein gehört in den allermeisten Fällen stratigraphisch in den Mittleren Buntsandstein und wurde in der Gegend von Miltenberg, Gambach, Gemünden und Thüngersheim gebrochen.

Chemisch besteht der " frische " Buntsandstein zu 80-90% aus SiO_2 . Al_2O_3: 4-10% ; Fe: um 2% ; CaO: 0,2-1% ; MgO, Na_2O, K_2O und TiO_2 meist unter 1%.

Dünnschliff: 60-80% Quarz, 5-20% Orthoklas, 1-3% Plagioklas. Biotit tritt gegenüber Muskowit zurück. Apatit und Zirkon sind häufige Schwerminerale. Eisenminerale sind Limonit Magnetit und Ilmenit.

Die Quarze sind meist leicht gerundet. Die Matrix wird durch Tonminerale, sekundäre Kieselsäure und etwas Limonit gebildet. Bei verwitterten Proben treten serizitisierte Feldspäte auf.

B.) WERKSANDSTEIN

Er gehört stratigraphisch zum Unteren Lettenkeuper und

wurde früher in vielen Brüchen in unmittelbarer Nähe von Würzburg gebrochen. Bekannt als Lieferant der Gesteine der Residenz und verschiedener anderer Barockbauten war der Steinbruch am Faulenberg, der erst in den letzten Jahren zugeschüttet wurde.

Der Werksandstein besteht zu 60-70% aus Quarz und zu 5-15% aus Feldspäten. Muskowit und Biotit sind mit 1-2% beteiligt. Obwohl im Buntsandstein maximal 23% Feldspate auftreten können, ist der Werksandstein im allgemeinen feldspatreicher. Die Korngröße und der Rundungsgrad der Quarze weisen auf eine stärkere Aufbereitung des Materials hin. Die Korngröße ist bedeutend kleiner als beim Buntsandstein.

Der Eisengenalt ist nicht so feindispers verteilt wie im Buntsandstein und tritt häufig in Nestern auf, während dort dünne Eisenhäutchen um die Quarze überwiegen. Hierauf gründet sich zum Teil die lebhaftere Färbung des Buntsandsteins.

Die Packung und der Verfestigungsgrad sind beim Werksandstein wesentlich lockerer als beim Buntsandstein.

Die scheinbare Porosität, die für die Lösungswanderung in einem Gestein von Bedeutung ist, liegt beim Werksandstein durchschnittlich 4% höher als beim Buntsandstein (KESSLER, 1960).

C.) MUSCHELKALK

Gesteine des Muschelkalks sind in Würzburg in großer Menge verbaut. KESSLER (1960) beschäftigt sich allerdings vor allem mit der Verwitterung der Sandsteine, die in unserem Bereich bedeutend augenfälliger ist.

In der Hauptsache handelt es sich um Gesteine des Quaderkalkfaziesbereiches Ochsenfurt-Kirchheim. Unter den untersuchten Proben befinden sich auch einige Gesteine der Normalfazies

des Oberen Hauptmuschelkalks,sowie von Schaumkalken aus dem Wellenkalk (Unterer Muschelkalk).

Der Quaderkalk besteht zu 90-97% aus Kalkspat mit äußerst geringen Mg-beimengungen. Hinzu kommen die Hydroxyde des 2 und 3-wertigen Eisens, in Einzelfällen etwas Phosphat, Quarz und noch seltener Feldspat.

Der Kalk ist grobkristallin (sparitisch), das Eisen teilweise später zugewandert, häufig in Nestern angereichert. Hohlräume und größere Poren können dem Gestein mitunter ein zelliges Aussehen geben.

Im Gegensatz zu der Sonderfazies des Hauptmuschelkalks sind die Kalke der Normalfazies dichte, graublaue bis weiße sehr feinkristalline (mikritische) Aggregate, die imIdealfall bis zu 98% Kalkspat enthalten. Im allgemeinen und besonders in den verwitternden Partien treten jedoch häufiger Tonlagen auf, von denen aus das Gestein verwittert.

Der Mg- gehalt geht selten über 1% und zeigt sich dann durch einen gelblichen Schimmer an. Phosphorite, Pyrit, Glaukonit und feindisperse Eisenminerale kommen vor.

Die teilweise sehr hohen Na- und K-gehalte entstammen den Tonmineralen. Die Schaumkalkprobe, sowie ein Süßwasserkalk aus der Mauer des Nationalmuseums in München werden unter der laufenden Probennummer beschrieben.

V

DIE METHODEN

A.) MIKROBIOLOGISCHE UNTERSUCHUNGSMETHODEN

Zu den mikrobiologischen Untersuchungen ist festzustellen, daß in keinem Falle genauere Bestimmungen von Keimarten durchgeführt wurden. Wenn Benennungen erfolgten, gelten diese immer für Genera und folgen den aus Selektivnährböden gefolgerten Benennungen von POCHON u. TARDIEUX (1964). Alle Keimzahlbestimmungen verstehen sich für Gruppen gleicher biochemischer Aktivität.

In einigen Fällen sind die physiologischen Eigenschaften jedoch so spezialisiert, daß nur ganz bestimmte Genera in Frage kommen. Bei den Thiobakterien z.B. ist die Weiterbestimmung der Spezies bezw. die Frage ob es sich nur um eine Variante handelt, noch völlig im Fluß.
In einem Nährboden, der keine organische Kohlenstoff- oder Stickstoffquelle enthält und als Energiequelle nur elementaren Schwefel oder Thiosulfat, können sich nur autotrophe Bakterien des Schwefelkreislaufes entwickeln, obwohl bekannt ist, daß auch andere Mikroorganismen, wie heterotrophe Bakterien, Aktinomyceten und Pilze fähig sind, elementaren Schwefel zu oxydieren.
In einem Nährboden ohne organische Stickstoffquelle, in dem Fixierung von Luftstickstoff und Wachstum von Bakterien nachweisbar ist, können selbstverständlich auch andere Keime wachsen als Azotobacter. Wenn aber in einem späteren Stadium der Kultur die charakteristischen Zysten von Azotobacter auftreten, kann man mit einiger Sicherheit sagen, daß der ermittelte Zahlenwert vor allem auf Azotobacter zurückzuführen ist. Ob es sich dabei um A. chroococcum oder A. agilis handelt, ist für die Bestimmung der Zahl der stickstoffbindenden Keime von geringer Bedeutung. Wichtig wäre die Geschwindigkeit der Bindung, die bei A. agilis bedeutend

größer ist. Andererseits sind die Kulturbedingungen von Azotobacter sehr variabel. In einigen Fällen muß Molybdän angereichert werden. Ein Unterschied in der Herstellung der Gesteinssuspension kann schon erhebliche Änderungen der gefundenen Keimzahlen herbeiführen (POCHON, 1958,p.88).

Diese angeführten Beispiele sollten zeigen, daß die Methode der Untersuchung eines Materiales auf Keimzahlen verschiedener physiologischer Gruppen einige Fehlermöglichkeiten aufweist, daß sie keinen Anspruch auf genaue Artbestimmung stellt, daß sie vielmehr möglichst schnell Daten für den mikrobiologischen Vergleich und die mikrobiologische Aktivität verschiedener Proben ergeben soll.

Die Durchführung der mikrobiologischen Methoden folgt im allgemeinen den Methoden, die am Institut Pasteur entwickelt und gesammelt wurden (POCHON u.TARDIEUX, 1964).

Diese Methoden sind in Deutschland noch nicht allgemein üblich. Vielfach wird z.B. die Zahl der ammonifizierenden Keime im Boden als Richtwert für die Gesamtkeimzahl angenommen. Die Bestimmung der Gesamtkeimzahl mittels eines Bodenextraktes ergibt höhere Werte, ist aber auch nur als Vergleichswert zu sehen.

Ebenso gibt es verschiedene Möglichkeiten,die Ammonifizierungskraft eines Bodens festzustellen, unter denen die quantitative Bestimmung des gebildeten Ammoniaks sicherlich der Keimzahlbestimmung vorzuziehen ist.

Alle Bestimmungsmethoden, mit Ausnahme der Zahlen der Pilze und Aktinomyceten beruhen auf der Kultur in flüssigen Medien, die mit Reihenverdünnungen des Untersuchungsmaterials beimpft werden.

Die Reihenverdünnungen wurden in folgender Weise hergestellt: 10 g des Untersuchungsmaterials werden in einem sterilen

Mörser staubfein zerkleinert und in einem Kolben mit sterilem dest. Wasser auf 100 ml aufgefullt, nachdem man die Suspension im Mörser hergestellt hat.
Diese Ausgangssuspension 1:10 wird unter Zufügen von wenig Pyrophosphat 2 Stunden auf einem Schüttelgerat homogenisiert. Zur besseren Homogenisation kann auch ein mechanisches Hochfrequenzgerät verwendet werden(GUNKEL,1964).
Von dieser Ausgangsverdünnung werden dann mit jeweils neuen sterilen Pipetten weitere Verdünnungen in Zennerpotenzen hergestellt. Diese Verdünnungen werden sofort anschließend zur Beimpfung der Selektivnährböden verwendet.
Von jeder Verdünnung werden mit einer 2ml Pipette 1 ml in drei bis funf Kulturröhrchen mit dem entsprechenden Medium gebracht. Jedem Nährboden wird ein nicht beimpftes Glas zur Kontrolle beigefügt. In einigen Fällen wurde als weitere Kontrolle ein beimpftes Gläschen nachträglich sterilisiert, um eventuelle Veränderungen im Nährboden durch die Gesteinssuspension allein ermitteln zu können.
Nach der entsprechenden Kulturzeit werden die positiven Gläschen jeder Verdünnung gezählt und mittels der statistischen Tafeln von MC CRADY, die bei POCHON u.TARDIEUX (1964) abgedruckt sind, ausgewertet.
Da es viele Bakterienarten gibt, die von einer einzelnen Zelle aus keine Kulturen ergeben, ist der ermittelte Wert immer nur ein Minimalwert. Der durch diese Methode gefundene Wert kann bis zu 3 Zehnerpotenzen von den mikroskopisch ermittelten abweichen (POCHON,1958 p.9).

Es muß berücksichtigt werden, daß die Keimzahlen Kulturen unter möglichst optimalen Bedingungen entstammen. Die dabei entfaltete biochemische Aktivität läßt sich keinesfalls unmittelbar auf die Natur übertragen.

Da jedoch alle Proben nach der gleichen Methode untersucht wurden , können die Zahlen ohne weiteres für Vergleichszwecke benutzt werden.

Zur Sterilisation der benutzten Glasgerate wurde ein Memmert-sterilisationsschrank benutzt (Sterilisationszeit nach Erreichen der Temperatur von 180°C: 1 h 20'). Zur Sterilisation der Nährböden wurde ein Hochdruckdampfautoklav der Firma Deutsch u. Neumann mit elektrischem Betrieb und automatischer Temperaturkontrolle benutzt(Sterilisationsdauer: Nach Erreichen des Betriebsdruckes im Innenraum wurde 55- 60' sterilisiert). Empfindliche Lösungen wurden auf einem SEITZ-Filtergerät sterilisiert.

Alle Kulturen mit Ausnahme der Algen wurden in einem Brutraum bei 28°C gehalten. 28°C ist die optimale Temperatur für den größten Teil der Bodenmikroorganismen.

In mehreren der zitierten Nährböden wurden drei Grundlösungen als Nährstoffquelle verwendet.

1) Winogradski'sche Lösung: Diese Salzlösung enthält eine Reihe von fur viele Mikroorganismen wichtigen Elementen in physiologischer Konzentration.

Zusammensetzung:

K_2HPO_4.....5g
$MgSO_4$.....2,5g
NaCl.....2,5g
$Fe_2(SO_4)_3$.....0,05g
$MnSO_4$.....0,05g
H_2O dest.....1 ooo ml

Herstellung (POCHON u.TARDIEUX,1964):

Alle Salze werden in kaltem dest. Wasser gelöst und gegen Bromthymolblau mit NaOH oder HCl auf einen pH-Wertvon 7-7,5 eingestellt. Ist der pH-Wert erreicht, so hat die Lösung einen opaleszierenden Schimmer.

Sie wird bei 110°C sterilisiert. Nach dem Erkalten muß sich eine wolkige kolloidale Schicht von einer klaren überstehenden Lösung abtrennen. (Vor Gebrauch aufschütteln)

2) Lösung von Oligoelementen:

Wenn die Nährböden mit destilliertem Wasser zubereitet werden, muß die notwendige Menge an Spurenelementen nachträglich zugefügt werden. Diese Lösung wird etwas konzentrierter angesetzt und in ml-Mengen zugefügt.

Zusammensetzung:

Kaliummolybdat	0,05 g
Eisen(III)chloridlsg.	1 Tropfen
Kobaltnitrat	0,05 g
Cadmiumsulfat	0,05 g
Kupfer(II)sulfat	0,05 g
Zinksulfat	0,05 g
Mangansulfat	0,05 g
Aqua dest.	1 000 ml

Die Lösung wird mit CO_2 aus der Druckflasche angereichert.

3) Der Bodenextrakt:

Zur Bestimmung der Gesamtmikroflora und als Zuschlag zu anderen Nährböden wird nach CHALVIGNAC (1956) eine normale Gartenerde mit einem pH-Wert um den Neutralpunkt bei 130°C extrahiert und heiß filtriert. Das Filtrat muß absolut klar und von bernsteingelber Farbe sein. Ev. kann für Bodenuntersuchungen etwas Pepton zugefügt werden.

Während der Voruntersuchungen für die mikrobiologische Analyse der hiesigen Gesteine wurde jedoch festgestellt, daß diese Methode in 2 Punkten abgeändert werden mußte, um zu für Gesteine optimalen Ergebnissen zu kommen. Eine Versuchsreihe mit verschiedenen Gesteinen und verschiedenen Extrakttypen zeigte, daß eine nährstoffreiche Gartenerde nicht so hohe Bakterienzahlen ergab, wie ein bedeutend ärmerer Boden. Die Ergebnisse sind in Tabelle I zusammengefaßt. Für die Analyse von so nährstoffarmen Böden (Mikroböden), wie sie ein verwitterndes Gestein darstellt, eignet sich am besten ein Extrakt aus einem unkultivierten, vegetationsarmen Boden, dessen Mineralzusammensetzung dem untersuchten Gestein mög-

TABELLE Ia

Extraktart	verw. Kalk	frischer Kalk	Sandstein	Sandstein	Gartenerde
aus Gartenerde	3 000 000	11 000	165 600	45 000 000	250 000 000
Boden aus dem Schuttkegel eines Kalkbruches	18 000 000	500 000	19 000 000	12 253 000	2 602 000
Boden aus einem Werksandsteinbruch	9 000 000	450 000	25 100 000	51 051 000	18 210 000
aus einem verwittertem Sandstein	350 000	45 000	104 840	612 000	520 500

TABELLE Ib

aus Kalkboden zentrifugiert	18 000 000	500 000	16 560 000	12 253 000	26 210 000
aus Kalkboden filtriert	16 000 000	500 000	13 240 000	13 360 000	25 250 000

lichst nahestehen sollte. Der Boden darf einerseits nicht zu reich an organischem Material sein, andererseits ergibt ein Extrakt aus dem zu untersuchenden Gestein selber zu niedrige Werte.

Es ist möglich, daß ein Extrakt aus einem Boden, der sehr reich an organischem Material ist, Hemmstoffe enthält, die sich auf die spezialisierte Flora des Gesteins, besonders deren heterotrophe Keime, ungünstig auswirken.

Da die Extrakte aus den Böden über Muschelkalk, besonders wenn sie noch wenig aufgearbeitet sind, einen relativ hohen Anteil an Tonkolloiden haben, war eine heiße Filtration auf Faltenfilter, wie sie CHALVIGNAC (1956) vorschlägt, nahezu unmöglich. Ebenso langsam ging die Filtration auf Filterscheiben unter Vakuum nach ROUGIEUX(1965) vor sich. Ich versuchte deshalb, die Tontrübe bei 4000 U / min. in der Zentrifuge abzutrennen und untersuchte, ob sich dabei ein nennenswerter Unterschied in den gefundenen Keimzahlen ergibt. Die Ergebnisse der beiden Methoden weichen jedoch nicht stark voneinander ab. Es wurde im Verlauf der Analysen immer dieser Weg eingeschlagen.

Im folgenden werden die einzelnen verwendeten Nährböden in ihrer Zusammensetzung und Auswertung kurz beschrieben, da sie größtenteils nicht in deutscher Sprache vorliegen und bei einzelnen Methoden kleinere Änderungen nötig wurden, da die Methoden von POCHON u. TARDIEUX (1964) für die Untersuchung von Böden gedacht waren.

4) Bestimmung der Gesamtkeimzahl mit Bodenextrakten:

Verwendet wurde im Falle von Sandsteinen ein Extrakt aus ein Sandsteinboden in einem Steinbruch, im Falle von Kalken ein Extrakt aus dem Schuttkegel eines Muschelkalkbruches.
Der Bodenextrakt wird in Reagensgläser von 22 mm Ø zu 5ml/ Gläschen abgefüllt und dann bei 110°C sterilisiert.
Beimpft wird mit den Verdünnungen 10^{-4}- 10^{-10}. Es werden 5 Kulturröhrchen/ Verdünnung beimpft.
Jeweils am 7. und 15. Tag wird abgelesen. Gläschen, in denen sich Keime entwickelten, werden trüb und ein wolkiger Niederschlag entsteht. In Zweifelsfällen wird mikroskopiert.

5) Bestimmung der Pilzzahl:

Prinzip: Auszählung der Pilzkolonien, die auf einem nährstoffreichen Agarnahrboden, der Bakterienhemmstoffe enthält, aufwachsen. Der nachstehende Nährboden ist für die nähere Bestimmung ungeeignet, da er das Aussehen der Pilzkolonien stark beeinflußt.
Zusammensetzung:

Pepton aus Caseinhydrolysat	5 g
Glucose	10 g
KH_2PO_4	1 g
Agar (Difco-Bactoagar)	20 g
wässrige Lsg. von Bengalrosa 1/3000	100 ml
Oligoelemente	1 ml
Aqua dest	1 000 ml

Die einzelnen Bestandteile werden erhitzt, dann wird der Agar unter Rühren oder im Dampftopf zugegeben. Der Nährboden wird in Gläschen zu 25 ml abgefüllt und bei 110°C sterilisiert. Am Verwendungstag werden die Gläschen im Wasserbad erhitzt. In vorbereitete Petrischalen wird je ein ml einer Lösung von 75 000 γ Streptomycin in 100 ml Wasser gefüllt. Wenn die Temperatur des Agars unter 50°C gesunken ist, wird er in die Petrischalen gegossen und gut mit dem Streptomycin vermengt. Beimpft werden 3 Schalen/ Verdünnung der Verdünnungen 10^{-3}- 10^{-7}. Nach einer Woche werden die Kolonien ausgezählt und der Mittelwert jeder Verdünnung errechnet. Bei dieser

Methode wurden die Hefen mit zu den Pilzen gezählt.

6) Aktinomyceten:

Prinzip: Kultur auf einem Nährboden, der das Wachstum der Aktinomyceten begünstigt unter optischer Ausscheidung der Bakterienkolonien.
Zusammensetzung:

Glycerin	10 g
Natrium-asparaginat	1 g
K_2HPO_4	1 g
Difco-Bactoagar	15 g
Oligoelemente	1 ml
Aqua dest	1 000 ml

Die heiße Lösung wird unter Umrühren mit dem Agar versetzt und zu 30 ml in 22er Gläschen gefüllt. Bei 110°C sterilisieren und bei Bedarf in Petrischalen ausgießen.
(Es ist nötig, die festen Nährböden bis zum Bedarf in Gläschen aufzubewahren, da Verunreinigungen durch Luft- und Bodenkeime in Petrischalen leichter möglich sind).
Beimpft werden die Verdünnungen 10^{-3} - 10^{-7}. Bebrütet wird eine Woche bei 28°C. Bei Auszählung unter dem Binokular lassen sich die Aktinomycetenkolonien leicht von den Bakterienkolonien unterscheiden.

7) Algen:

Prinzip: Beimpfung einer für Algen günstigen Nährlösung mit Reihenverdünnungen des Gesteinsmaterials und Kultur unter günstigen Temperatur- und Lichtbedingungen.
Zusammensetzung:

$Ca(NO_3)_2$	0,1 g
$MgSO_4$	0,03 g
K_2HPO_4	0,04 g
KNO_3	0,1 g
$FeCl_3$	Spuren
Bodenextrakt	20 ml
Aqua dest	auf 1000 ml

Abfüllen in 22er Reagensgläser und bei 110°C sterilisieren.

Beimpft werden 5 Gläschen/Verdünnung der Gesteinssuspensionen 10^{-1}-10^{-4}. Die Gläschen werden 3 Wochen bei 20°C und bei 12 von 24 Stunden Belichtung gehalten. Nach der Kulturzeit werden die Gläschen, in denen sich Algen entwickelten, nach den Mc Crady'schen Tafeln ausgewertet.

STICKSTOFFKREISLAUF

8) Ammonifizierung:

Bestimmt wird die Zahl der Keime/ g Trockenmaterial, die fähig sind eine angemessene Stickstoffquelle unter Ammoniakbildung abzubauen. Bei dieser Methode wird nicht nur die Keimzahl bestimmt, sondern auch die Aktivität in Relation zur Kulturdauer.

Zusammensetzung:

Winogradski'sche Lösung.....50 ml
Asparagin.....0,2 g
Oligoelemente..... 1 ml
Aqua dest.....1000 ml

Der Nährboden wird zu 10 ml in 22er Gläschen gefüllt und bei 110°C sterilisiert. Beimpft werden je 3 Gläschen der Verdünnungen 10^{-1}-10^{-8}.

Jeweils am 1.,2.,3.,4.,5.,7.,9.,12.,und 15. Tag wird in den Kulturröhrchen auf Ammoniak geprüft. Man entnimmt zuerst der stärksten Verdünnung und dann aufsteigend mit einer Pasteurpipette ca 1 ml und prüft dann mit Nessler's Reagens. Zweckmäßigerweise bewahrt man bei öfterem Gebrauch die Kalilauge und die Kaliumjodid-Quecksilberjodidlösung getrennt auf.

9) Aerobe Stickstoffbindung:

Dieser Nährboden ist geeignet, aerobe Keime wachsen zu lassen, die ihren Stickstoffbedarf aus der Luft zu beziehen fähig sind. Es handelt sich vor allem um Keime vom Typ Azotobacter.

Zusammensetzung:

Winogradski'sche Lösung.....50 ml

Mannose.....10 g
Bodenextrakt.....10 ml
Oligoelemente.....1 ml
$CaCO_3$.....0,5g
Aqua dest.....1 000 ml

Der Nährboden wird zu 5 ml in 22er Gläschengefüllt und bei 110°C sterilisiert. Bei Bodenproben werden je 5 Gläschen der Verdünnungen 10^{-1}-10^{-6} beimpft. Bei den Gesteinsproben genügten die Verdünnungen 10^{-1}-10^{-4}, da aerobe Stickstoffixierer nur in verschwindenden Zahlen auftreten. Abgelesen wird nach 7 und 14 Tagen. Wachstum von Azotobacter zeigt sich durch einen weißen Schleier an der Oberfläche der Nährlösung, der beim Aufschütteln nach unten sinken kann. Nach einigen Tagen kann sich der Schleier braun verfärben. Bei älteren Kulturen treten große runde Zysten im mikroskopischen Bild auf.

10) Anaerobe Stickstoffbindung:

Stickstoffbindung findet auch unter anaeroben Verhältnissen statt. Vor allem Keime vom Genus Clostridium können ihren Stickstoffbedarf ohne organische Stickstoffquelle decken.
Zusammensetzung:

Winogradski'sche Lösung.....50 ml
KH_2PO_4.....0,75 g
1/10 n Natronlauge.....33 ml
Glucose.....10 g
Bodenextrakt.....10 ml
Oligoelemente.....1 ml
Aqua dest.....auf 1 000 ml

Der Nährboden wird in Reagensgläser mit 16 mm Ø zu je 10 ml abgefüllt und in jedes Gläschen ein Durham'sches Röhrchen eingebracht. Auf diese Weise wird durch die große Schichthöhe ein annähernd sauerstofffreies Milieu erzeugt.
Beimpft werden je 5 Gläschen/Verdünnung mit den Verdünnungen 10^{-1}- 10^{-5}. Anwesenheit von Keimen zeigt sich nach 7 bis 15 Tagen durch Gasbildung und Buttersäuregeruch.
(Es ist darauf zu achten, daß nach dem Sterilisieren kein Sauerstoff in den Gasröhrchen zurückbleibt.)

11) Nitrifikation:

Es wird mit Selektivnährböden untersucht, ob die Probe Keime enthält, die fähig sind Ammoniak zu Nitrit oder Nitrit zu Nitrat zu oxydieren. Die Oxydation durch heterotrophe Keime wird nicht berücksichtigt, da der Nährboden frei von organischer Substanz ist. Wenn Oxydation stattfindet, kann es sich nur um die autotrophen Oxydanten oder um freie Enzyme handeln. Wie bei allen chemischen Nachweisen muß vorher geprüft werden, ob die Reaktion mit dem Nährboden allein negativ verläuft. Geprüft wird mit Diphenylamin.
Zusammensetzung:

a) Oxydation zu NO_2

Winogradski'sche Lösung.....50 ml
$(NH_4)_2SO_4$.....0,5g
$CaCO_3$.....1 g
Aqua dest.....auf 1 000 ml

b) Oxydation zu NO_3

Winogradski'sche Lösung.....50 ml
$NaNO_2$.....1 g
$CaCO_3$.....1 g
Aqua dest.....auf 1 000 ml

POCHON u. TARDIEUX (1964) empfehlen 7 mmØ Gläschen zum Abfüllen des Nährbodens. Es läßt sich aber einfacher und genauer arbeiten, wenn auch hier 16er Gläschen verwendet werden. Es werden 5 ml Nährboden abgefüllt und bei 110°C sterilisiert. Beimpft werden je 3 Gläschen mit den Verdünnungen 10^{-1}-10^{-6}. Kulturdauer: 3 Wochen bei 28°C.
Nach drei Wochen werden die Kulturen ausgeschüttet und in dem im Glas verbleibenden Tropfen wird mit Diphenylamin auf Nitrit oder Nitrat geprüft. Überschüssiges Nitrit im 2. Nährboden wird zunächst durch Harnstoff entfernt. Die positiven Gläschen werden nach den Mc Crady'schen Tafeln ausgewertet.

SCHWEFELKREISLAUF

12) Mineralisation von organischen S-verbindungen:

Es sollte untersucht werden, ob das Material Keime enthält, die unter anaeroben Bedingungen fähig sind, eine organische S-verbindung unter Freisetzung von Sulfid abzubauen.

Zusammensetzung:

$(NH_4)Cl$	1 g
K_2HPO_4	0,5 g
$CaCl_2$	0,1 g
Natriumlactat 60%	5 ml
d-l Methionin	1 g
Ammonium-Eisen(III)citrat,grün	0,5 g
Bodenextrakt	20 ml
Aqua dest	auf 1 000 ml

Der Nährboden wird zu 5 ml in 16er Gläschen gefüllt und bei 110°C sterilisiert. Beimpft werden 3 Gläschen/Verdünnung der Verdünnungen 10^{-1}-10^{-4}.Nach dem Beimpfen wird das Kulturgläschen über der Flamme ausgedünnt, evakuiert und zugeschmolzen. In den Verdünnungen, in denen Keime vorhanden waren, die das Methionin abbauen,bildet sich schwarzes Eisensulfid.

13) Anaerobe Reduktion von Sulfaten :

Prinzip: Beimpft wird eine Nährlösung, die ein Sulfat, eine anorganische Stickstoffquelle und eine angemessene Wasserstoffquelle enthält. Sind entsprechende Keime vorhanden, so wird das Sulfat zu Sulfid reduziert und bei POCHON u. TARDIEUX (1964) durch einen in den Nährboden eingebrachten blanken Eisennagel , der sich schwärzen muß,nachgewiesen. Diese Methode hat den Nachteil, daß keine voll anaeroben Bedingungen herrschen, außerdem ist die Schwärzung des Nagels oft zweifelhaft. Es wurde vorgezogen, wie bei der Mineralisation (Nr.12) Eisen(II)-sulfat zuzugeben, sodaß sich Eisensulfid bilden kann. In diesem Fall mussen die Gläschen ebenfalls zugeschmolzen werden.

Zusammensetzung:

NH_4Cl	1 g
K_2HPO_4	0,5 g

$MgSO_4$.....2 g

Na_2SO_4.....0,5 g

$CaCl_2$.....0,1 g

60% Na-lactatlösung.....6 ml

Aqua dest.....1.000 ml

Das Medium wird in 16er Reagensglaser zu je 5 ml abgefüllt und bei 110°C sterilisiert. Beimpft werden 3 Gläschen/ Verdünnung mit den Verdünnungen 10^{-1}-10^{-4}. Nach dem Beimpfen werden jedem Gläschen 3 Tropfen einer 10%igen Eisensulfatlösung zugefügt, die auf Seitzfilter sterilisiert wurde. Die Gläschen werden evakuiert, über der Flamme ausgedunnt und zugeschmolzen. Nach drei Wochen muß sich bei Vornandensein von Sulfat reduzierenden Keimen in den Gläschen ein schwarzer Eisensulfidniederschlag gebildet haben.

14) Oxydation von elementarem Schwefel:

Ein völlig anorganisches Milieu wird mit Schwefel als Energiequelle versehen. Bei Anwesenheit von autotrophen Keimen vom Genus Thiobacillus findet Oxydation des Schwefels zu leicht nachweisbaren Sulfaten statt. Die Sulfate werden mit Bariumchloridlösung nachgewiesen. Die Luftoxydation von Schwefel im Labor geht nicht schnell genug vor sich, um die Ergebnisse beeinflussen zu können. Vergl. hierzu SOKOLOVA u. KARAVAIKO (1962).

Zusammensetzung:

K_2HPO_4.....0,25 g

$MgCl_2$.....0,1 g

NaCl.....0,1 g

NH_4NO_3.....2 g

$CaCO_3$.....5 g

Aqua dest.....1 000 ml

Das Calziumkarbonat dient als Puffer gegen zu starke Säureentwicklung und gleichzeitig als Konlenstoffquelle für die Synthese.

Der Nährboden wird zu 5 ml in 22er-Gläschen gefüllt und bei 110°C sterilisiert. Vor dem Beimpfen wird dem Nanrboden eine Spatelspitze Schwefelblume zugefugt, die mehrmals für einige Stunden auf 115°C erhitzt wurde. Beimpft werden je 3 Gläschen der Verdünnungen 10^{-1}-10^{-6}. Nach drei Wochen Kulturdauer wird in allen Gläschen der pH-Wert und die Anwesenheit von Sulfat überprüft.

15) Oxydation von Schwefelwasserstoff:

Die Zusammensetzung und Behandlung des Nanrbodens ist dieselbe wie die von Nanrboden 14. Es wird jedoch kein sublimierter Schwefel zugefügt. Die Gläschen werden mit den Verdünnungen 10^{-1}-10^{-6}beimpft. Nach dem Beimpfen werden die mit Watte verstopften Gläschen unter eine Glasglocke gebracht, in der mittels einer übersättigten Natriumsulfidlösung eine H_2S- Atmosphäre hergestellt wird.
Nach drei Wochen wird der pH-Wert überprüft und auf eventuell gebildetes Sulfat geprüft. Die Ergebnisse werden wie immer mittels der MC CRADY'schen Tafeln ausgewertet.

16) Prüfung auf Keime, die dreiwertiges Eisen reduzieren:

Eisen wird durch eine große Zahl von Mikroorganismen reduziert.
Es sollte in einigen der Proben, bei denen das Verhaltnis von zweiwertigem zu dreiwertigem Eisen anormal war, überprüft werden, ob eventuell die Mikroflora einen Einfluß auf die Wertigkeit des Eisens in verwitternden Gesteinen hat. Als Nanrboden wurde ein leicht modifiziertes Medium von BROMFIELD (1954) verwendet.

Zusammensetzung:

K_2HPO_4	0,05 g
$MgSO_4 \cdot 7\ H_2O$	0,02 g
$(NH_4)_2SO_4$	0,1 g
Glucose	0,5 g
Hefeextrakt	0,015 g
Aqua dest	100 ml

Der Nahrboden wurde in 16er-Glaschen abgefüllt undzwar bis 1,5 cm unter den Rand. Jedem Glaschen wurde eine 1%ige Suspension von frischgefalltem Eisenhydroxyd zugefügt (1ml). Kurz vor dem Beimpfen wird ein ml einer 5%igen 2,2-Dipyridil-lösung eingetropft.
Bei Auftreten von 2-wertigem Eisen färbt sich der Nährboden orangerot. Als positiv wurden die Kulturen gezählt, die sich nach 2 Tagen verfarbt hatten.

B PHYSIKALISCHE METHODEN

1)Bestimmung des Wassergehaltes:

Um die ermittelten Keimzanlen auf das Trockengewicht zurückrechnen zu können,wurden Trockengewichte von allen Proben bestimmt. Ermittelt wurde der Gewichtsverlust nach 48 Stunden Trocknen bei 110°C.

2) Messungen des pH-Wertes:

Von allen Proben wurden 2 pH-Werte gemessen. Verwendet wurde ein pH-meter der Firma Rusl mit 2 -kreisiger Skala. Die fur die chemische Analyse bestimmten Proben wurden mit wenig aufgekochtem bidestilliertem Wasser verrührt und mit einer Betonelektrode gemessen. Nach Auffullen auf 250 ml und 2 stündiger Extraktion wurde der pH-Wert des Filtrates bestimmt.

C CHEMISCHE METHODEN

Für die chemische Analyse der Proben waren vor allem 2 Gesichtspunkte ausschlaggebend.
1.) Es sollte festgestellt werden, welche Elemente beim Verwitterungsvorgang aufgeschlossen werden und sich anreichern bezw.sich von vorneherein mit Salzsäure extrahieren lassen.

2.) Wollten wir wissen,welche Elemente von vorneherein oder durch Verwitterung wasserloslich sind und als solche längere Zeit in den obersten Schichten des Gesteines erhalten bleiben.

Eine Bauschanalyse kam aus diesen Gründen nicht in Frage, weil sie eine Fraktionierung der Aufschließbarkeit nicht erlaubt; und so weniger Möglichkeit zu Vergleichen zwischen"unverwittertem" und "verwittertem" Material bietet .
Der Salzsäureaufschluß empfahl sich vor allem,weil nach verschiedenen Arbeiten der Göttinger Schule unter CORRENS die Feldspate durch Salzsäure nur unwesentlich angegriffen werden, wenn sie noch unverwittert sind.

Die Auswahl der zu bestimmenden Ionen war zum Teil durch die mikrobiologische Fragestellung bedingt, da der Einfluß der Mikroflora auf den Chemismus eines verwitternden Gesteines untersucht werden sollte, z. T. auch durch das Verhältnis von Aufwand zu Aussagewert.
Der Phosphatkreislauf wurde sowohl chemisch als biologisch ausgeklammert, da eine umfangreiche bodenkundliche Literatur über diesen Komplex existiert.
Alle verwendeten chemischen Methoden sind in der Literatur gut beschrieben, einschließlich der dabei auftretenden Fehlerquellen, sodaß sich eine Angabe der Fehlergrenzen der Methoden erübrigt. In den Tabellen wurde durch Angabe verschiedener Dezimalstellen auf diesen Umstand Rücksicht genommen. Die 3. Dezimale wurde bei den Alkalien beibehalten, um zeigen zu können, daß sich Spuren nachweisen ließen; der absolute Wert ist in dieser Größenordnung bereits ungenau.

1) Aufbereitung zur chemischen Analyse und Analysengang:

Von den nach der mikrobiologischen Analyse verbleibenden Probenmengen (50-200 g), die in einer Scheibenschwingmühle auf eine Korngröße unter 0,1 mm zerkleinert wurden, kamen 6 g zur Einwaage. Nach dem Aufschlämmen und dem Messen des pH-Wertes wurde mit Aqua bidest. auf 250 ml gebracht und 2 Stunden gekocht. Das Filtrat wurde gesammelt und wieder auf 250 ml aufgefüllt. Während des Kochens wurde die Wassermenge ungefähr konstantgehalten, um keine Verschiebungen der Sulfatlöslichkeit zu erhalten.
Der Rückstand wurde mit 230 ml 1n HCl p.a. versetzt und 12 Stunden auf dem Wasserbad bei 92°C extraniert. Es wurde warm filtriert und der Rückstand gewogen.

2) Flammenphotometrie :

Die Elemente Na und K wurden mit einem Eppendorf-Flammenphotometer bestimmt. Störeinflüsse wurden nach dem Nachahm-Korrekturverfahren ausgeschaltet. In der Methodik wurde der übliche Weg eingeschlagen (HERRMANN,1965; KESSLER 1960).

3) Komplexometrie:

Die Elemente Ca und Mg wurden in beiden Aufschlüssen komplexometrisch bestimmt. Für Ca wurde eine Indikatorverreibung von Calconcarbonsäure mit Natriumsulfat verwendet. Nach Zerstören des Farbkomplexes wurde Mg mit Indikatorpuffertabletten und EDTA titriert.
Von Ca wurden flammenphotometrische Kontrollmessungen (25 Proben) durchgeführt, die um 0,1-0,5% höher lagen als die durch Titration ermittelten Werte.

4) Kolorimetrie von Eisen:

In beiden Aufschlüssen wurde Eisen in seiner 2-wertigen und 3-wertigen Form bestimmt. Die Methode basiert darauf, daß 1,10-Orthophenanthrolin mit 2-wertigem Eisen einen orangeroten Komplex bildet. Durch Messungen vor und nach dem Reduzieren der Analysensubstanz mit Hydroxylamin(Hydrochlorid) können beide Werte errechnet werden. Die Methode ist im pH-Bereich von 3,0-9 durchführbar. Um Störungen durch Schwermetalle auszuschalten wurde der pH auf 3,5 gegen Bromphenolblau eingestellt. Puffer: 20%ige Ammoniumacetatlösung. Sensitivität: Die Absorbtionskurve zeigt bei 490 mμ ein Maximum = 10600. Es wurde jedoch bei 488 mμ gemessen, um bei eventuellen Schwankungen nicht in den Abfall nach dem Maximum zu geraten. Zwischen 486 und 488 mμ ist eine kleine Schulter in der Absorbtionskurve. Gemessen wurde auf einem kombinierten Gerät der Firma BECKMANN. Literatur: CHARLOT,1964 und MEHLIG u. HULETT,1942).

5) Chlorid:

Chlorid wurde nur in den Wasserextrakten nachgewiesen. Nach einer quantitativen Prüfung wurden die chloridhaltigen Extrakte mit 2 ml gesättigter Ammon-Eisen(III)-Sulfatlösung versetzt und bis zum Verschwinden der braunen Farbe mit HNO_3 behandelt. Dann wurde quantitativ ein Überschuß an $AgNO_3$-lösung zugefügt. Der Niederschlag wurde mit Äther zusammengeballt.

Die überschüssige Silbermenge wurde mit NH_4SCN-lsg. zurücktitriert.(BILTZ-FISCHER,1960; JANDER,1963).

6) Sulfat:

Sulfat wurde nach 2 verschiedenen Methoden bestimmt. In den HCl-Auszügen wurde gravimetrisch durch Wägung von Bariumsulfat bestimmt (BILTZ-FISCHER, 1960).
Die Wasserauszüge wurden nach FISKE (1921), modifiziert durch JÄRVINEN (1927) und Mitarbeiter des B.R.G.M. (unveröffentlicht) titriert. Sulfat wird in Acetonmilieu als Benzidiniumsulfat gefällt, in Wasser gelöst und mit 0,02 n NaOH titriert. Es ist wichtig, daß der Rückstand im Filter vor dem Lösen mit einem Gemisch von 95% Aceton und 5% Wasser völlig neutral gewaschen wird.

7) Nitrit und Nitrat:

Nitrit und Nitrat wurden zusammen nach COTTE u. KAHANE (1946) durch Destillation bestimmt.
Verwendet wurde eine Mikrokjeldahlapparatur. Die stickstoffhaltige Lösung wird mit Silbersulfat- und Eisensulfatlösung versetzt und 50% NaOH zugegeben. Das Destillat wird in 5% Borsäure aufgefangen. Titriert wurde mit 0,002 n H_2SO_4.
Indikator: Mischindikator nach Tashiro aus Bromkresolgrün und Methylrot.

8) Karbonat:

Karbonat wurde nur in den Kalkproben aus je drei Einwaagen zu 100 mg volumetrisch bestimmt. Zum Eichen wurde $CaCO_3$ p.a. verwendet. Nach jeder 5. Bestimmung wurde eine Kontrollmessung mit $CaCO_3$ durchgeführt.

VI

BESCHREIBUNG DER EINZELPROBEN UND ERGEBNISSE DER BIOLOGISCHEN UND CHEMISCHEN ANALYSE

Das Material, daß gesammelt wurde, unterliegt je nach dem Entnahmeort verschiedenen äußeren Einflüssen, die in der Einleitung skizziert wurden. Diese beeinflussen in starkem Maße die Verwitterung der Gesteine, sowie im Einzelnen deren Biosphäre und Chemismus. Aus diesem Grund soll in einer knappen Beschreibung aller Proben auf diese Einzelheiten Rücksicht genommen werden. Biologische und chemische Besonderheiten werden bereits hier erwähnt. Der Anhang, der die Analysendaten in übersichtlicher Form zusammenstellt, soll den Vergleich mit den ermittelten Daten ermöglichen. Es wäre wegen der großen Zahl der Einzeldaten nicht möglich gewesen, die Ergebnisse in Übersichtstabellen für mehrere Proben zusammenzustellen. Die Reihenfolge der Proben ist in Probenbeschreibung und Anhang die gleiche.
Auf möglichst viel Bildmaterial wurde Wert gelegt, um die einzelnen Erscheinungen deutlich zu machen. Chemische Analysen wurden nicht zu allen Proben durchgeführt. War das Ergebnis einer Analyse negativ, so wurde an die entsprechende Stelle eine 0 gesetzt; wurde eine Analyse nicht durchgeführt, so blieb der Raum leer, oder es wurde ein+ eingesetzt.
Die mikrobiologischen Daten sind statistisch ausgewertet und wurden auf das Trockengewicht berechnet, sobald die Feuchtigkeit 1% überschritt. Die Entwicklung der Ammonifizierung wurde bei jeder Probe verfolgt, wird aber aus Raumgründen

nicht immer dargestellt. In der Diskussion werden charakteristische Kurven und Integrationskurven dargestellt.

Proben 1, 2 und 3

Quaderkalk vom Treppengelander des Mineralogischen Instituts. (Erbaut 1902). Säule aus 2,4 m Höne über dem Erdboden. An den meisten Säulen entstenen an den NW-exponierten Kanten und Kenlungen Protuberanzen und Abschalungen. Die schwarze Ruß- und Staubkruste, die diese Partien bedeckt , bricht auf und darunter kommt weißes staubiges Material zum Vorschein. Die Entnahmestelle ist frei zugänglich für Abgase vom Heizkraftwerk. Sie liegt nach einem Gutachten der Technischen Hochschule Karlsruhe für die Stadtwerke in einer Zone verstärkter Ruß- und Staubablagerung. An den Säulen sind weder Algen noch Flechten festzustellen. Algen kommen am Fuße der Mauer,soweit das Spritzwasser reicht,vor. Flechten und Algen kommen auf den horizontalen und geneigten Flächen der Balustrade vor.

Probe 1: Absandende Partien, die die Krusten durchbrechen. Diese Partien reichen teilweise bis zu 3 cm Tiefe. Entnommen im September 1964.

Probe 2: Unter der abstaubenden Zone entnommene feste Gesteins teile, die nur mit dem Hammer zerlegbar waren. Die Brocken wurden vor der Verarbeitung über der Flamme sterilisiert.

Probe 3: Diese Probe wurde entnommen,um eventuelle jahreszeitliche Schwankungen festzustellen. Das gleiche Material wie Probe 1, nicht im September, sondern im März entnommen.

Abb.1: Treppengeländer des Mineralogischen Instituts

Probe 4:

Muschelkalkmauer in der Kettengasse. Die Mauer war früher teilweise mit Putz überzogen. Sie besteht aus dichten Kalken der Normalfazies. Exposition SE. Sonneneinstrahlung durch gegenüberliegende Gebaude nur kurzzeitig. Die Mauer ist, wie fast alle freistehenden Mauern, feuchter als geschlossene Gebäude. Einzelne über die ganze Mauer verteilte Steine sind von dünnen Tonlagen ausgehend angegriffen und blattern ab. Die Probe stammt aus einem zerfallenden Block in 1,3 m Höhe. Ein Kapillarsaum war nicht ausgeprägt. Algen und Flechten mit dem bloßen Auge nicht feststellbar.

Probe 5:

Hinter den Felsengassen unter der Festung anstehende Teile des Wellenkalks. Die Kalke sind zu erbsengroßen, mit Tonhäutchen umgebenen Bröckchen zerfallen. Sie lösen sich sehr leicht von der Wand, besonders in durch Vorsprünge gebildeten

Nischen. Die bröckelige Form ist allerdings durch das Sediment vorgezeichnet. Die Probe wurde in 1,5 m Höhe über einem Grasboden entnommen. Ein Weg für aufsteigende Lösungen wäre gegeben. Kapillarsaum nicht erkenntlich. Kein Algen- und Flechtenbewuchs. Sehr hoher Tonanteil. Für anstehendes Gestein sehr stark entwickelte Mikroflora.

Probe 6:

Dicke Staub- und Aschenkruste von einer Quaderkalkmauer gegenüber dem Gaswerk. Die Krusten sind hier bis zu 2 cm mächtig, stark narbig und zerklüftet. Die Grenze zum Mauerstein ist nicht eindeutig festzustellen, da unter der stark verbackenen und harten Kruste der Stein staubig zerfällt. Kein Kapillarbereich. Höhe über der Straße: 1,6 m. Der unlösliche Rückstand ist durch die Asche besonders hoch. Exposition nach NW. Die staubige Zwischenschicht unter den schwarzen Krusten ist sehr häufig, tritt aber nicht immer auf.

Proben 7 und 8:

Beide Proben entstammen der Begrenzungsmauer des - mittlerweilen stillgelegten- Gaswerks. Diese Mauer ist nicht so stark mit Krusten bedeckt, wie die gegenübergelegene der die Probe 6 entstammt. Die Mauer ist SE-exponiert. Die Probe entstammt einer Partie 2,4 m über dem Abwassergraben. Probe 7 ist die oberste verwitterte Partie eines gelblichen Kalkes der Normalfazies, der eingelagerte Tonlagen hat, entlang derer die Verwitterung nach innen vorschreitet.(Mechanischer Zugang für biochemische Verwitterung). Die dichten grauen Partien sind stabiler, die gelblichen, tonreichen zerfallen schneller.

Probe 8 ist mit dem Hammer lösbares, festes Material aus dem

Inneren des Blockes. Auch an den noch zusammennangenden Partien zeigen sich Risse und Anzeichen der fortschreitenden Verwitterung.

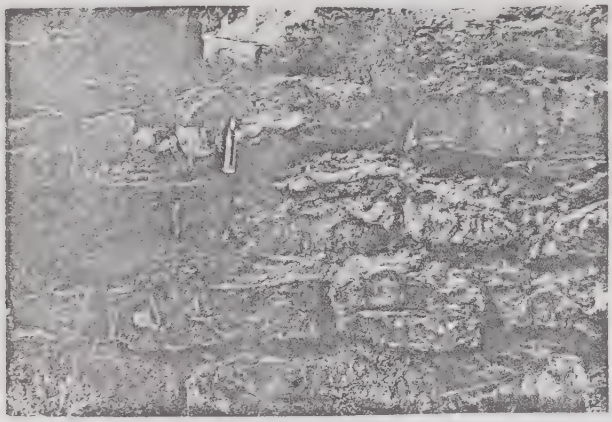

Abb.2: Mauer des Gaswerkes mit verwitterndem Muschelkalk.

Proben 9 und 10:

Beide Proben entstammen der Quaderkalkverkleidung der Frontseite des Geologischen Institutes (erbaut 1902). Die Orientierung ist SSE. Die Proben wurden in 0,5 m Höhe entnommen.

Probe 9 ist weißliches pulveriges Material, das sich unter einer dünnen geschwärzten Haut befand. Diese Abfolge ist bei Probe 25 und 26 viel starker ausgepragt (Abb.).

Probe 10 sind abschuppende Plättchen von 2-8 mm Macntigkeit, zwischen denen sich wiederum weißliches Pulver befand. Die Plättchen wurden abgepinselt und abgeflammt.

Proben 11 und 12:

Beide Proben wurden an der Begrenzungsmauer der Einfahrt zur Tiefgarage zwischen Schlachthof und Mainseite entnommen. Die Mauer stützt beidseits das Erdreich ab. Sie besteht z.T. aus Quaderkalkblöcken, z.T. aus Kalken der Normalfazies. Die gegen den Main liegende Mauer ist starker verwittert, als die der Sonne ausgesetzte Südmauer. Exposition: NE. Die stärksten Verwitterungsspuren zeigen Bausteine unmittelbar unter der gesimsbildenden Mauerkrone. Ebenso kann die Tatsache einen Einfluß haben, daß hinter der am starksten verwitternden Partie die Zone des Bodens ist, die die höchste biologische Aktivität besitzt. Das Einwandern von Keimen und Lösungen aus dem Boden durch die Fugen ist also leicht möglich (Vergl. Probe 90).

Probe 11 entstammt der Partie direkt unter dem Sims in 1,9 m Höhe über der Einfahrt. Dieser Kalkblock verwitterte in kleinen abblätternden Schüppchen.

Probe 12 entstammt einem löcherigen, zelligen Block aus der gleichen Zone. Die Erhebungen zwischen den einzelnen Löchern sind mit Staub- und Aschenkrusten besetzt und verhärtet.

Der Einfluß des Heizkraftwerkes ist leicht möglich und drückt sich eventuell in den Zahlenwerten der Schwefelbakterien in diesen Proben und in Probe 90 aus.

Die Verbrennungsgase besonders des Heizöles enthalten sehr viel Schwefel.

Flechten- und Algenbewuchs trat wieder nur auf der horizontalen Fläche des Mauersimses auf.

Proben 13 und 14:

Neubaukirche.- Die Proben entstammen der Unterkante eines Quaderkalksimses vom Turm der Ecke Neubaustr. (erbaut 1627) Die Wand ist süd-exponiert. Wichtig ist, daß sich Feuchtigkeit lange im Schatten des Simses hält. Höhe über dem Boden: 3 m.
Probe 13 ist pulveriges Material unter einer Leiste, die sich ca 25 cm unter der Kehlung befindet.
Probe 14 ist ein Teil der Kante, die sich mit der Hand leicht brechen ließ; also angewittertes Material, das noch die ursprüngliche Form besitzt. Sulfat ist gegen Karbonat in beiden Proben stark angereichert.

Proben 15, 16 und 17 :

Alle drei Proben stammen von Fensterrahmen der Ruine des Hofes Emeringen (erb. 1700) in der Martinsgasse.Exposition: SE. Keine Algen oder Flechten.
Probe 15 ist mit dem Finger abreibbarer Staub einer Auflockerungszone, die bis 0,5 cm machtig ist.
Probe 16 entstammt dem unterlagernden, sehr feuchten,noch festem Gestein. Die Feuchtigkeit findet seit der Zerstörung im Krieg ungehindert Zugang. Im allgemeinen waren Proben aus Ruinen bedeutend feuchter, als solche aus geschlossenen Gebäuden; besonders auch,wenn im Inneren der Ruinen noch Schutt lagert. Das Material wurde im Labor abgeflammt.
Probe 17 entstammt einem anderen Fenster des gleichen Gebäudes das weniger Lockermaterial besaß, bei dem die Struktur des Steines aber so weit gelockert war, daß sich Kanten mit der Hand abbrechen ließen. Die walnußgroßen Stücke, die sich entfernen ließen, wurden ebenfalls im Labor abgeflammt.

Abb. 3: Gesims der Universitätskirche. Proben aus der rechten Partie

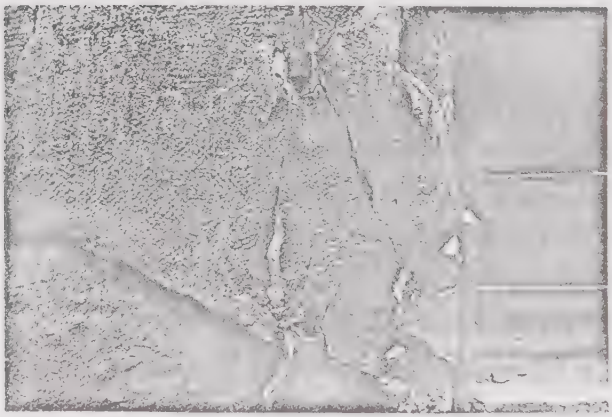

ABB.4: Kellerfenster aus der Heinestr. Pulverige Verwitterung und Sprengung durch Eisendübel.

Proben 18, 19 und 20:

Alle drei Proben entstammen Kellerfensterumranmungen eines Gebäudes in der Heinestr. Möglicherweise gehören sie noch zu den ehemaligen Kanonikatsnöfen (1716-34). An allen Fenstern treten neben Sprengungen durch eingelassene Eisendübel aufgelockerte, absandende Partien auf, sowie Kalke, die in Schichten bis zu 3 cm Mächtigkeit in größeren Flächen sich aufwölben und abplatzen. Exposition nach W. Probenentnahmestellen ca. 50 cm über der Straßendecke.

Probe 18 sind abschabbare obere Partien einer bis 2cm tief greifenden Verwitterungszone.

Probe 19 wurde darunter mit dem Hammer losgeschlagen und im Labor abgeflammt.

Probe 20 stammt von einem anderen Fenster. Hier löste sich ein großer Brocken durch die Sprengwirkung der Dübel. Der Brocken war außen rotverfarbt und ließ sich sehr leicht zerschlagen. Beides, Sprengung wie Rotfarbung, deuten auf Brandschäden hin. Der Brocken wurde zerschlagen, die Einzelstücke abgeflammt und Material aus dem Kern verwendet. Das entsprach einer Tiefe von 5-7 cm. Alle drei Proben sind aus Quaderkalk.

Probe 21:

Mit dem Skalpell abschabbarer Kalkstaub von der alten Mauer gegenüber dem Chemischen Institut neben der Zahnklinik. Exposition NNE. Es traten keine Flechten und Algen auf. Die Mauer besteht aus dichten, graublauen bis gelben Kalken der Normalfazies des Hauptmuschelkalkes. Tonlagen sind häufig. Die Steine verwittern hier besonders an den dem Mörtel benachbarten Ecken und Kanten. An einigen Stellen blühen Salze aus.

Proben 22,23 und 24:

Alle drei Proben wurden an einer Quaderkalkmauer einer Ruine in der Weißenburgerstr. entnommen. Die Probenpunkte sind S-exponiert. Auf Abb. 5 sieht man deutlich den Einfluß der Exposition auf die Verwitterung und das Aussehen der Mauer. Die helle Mauernische ist den westlichen Winden und Schlagregen ausgesetzt, zeigt kaum Verwitterungsspuren und keine Ruß-Aschenkrusten. Die ganze Mauer zeigte mit dem bloßen Auge keinen Flechtenbewuchs oder Grünfärbung durch Algen.
Probe 22 ist abschabbares, staubiges Material von der Oberfläche eines der Blöcke mit Salzausblühungen (Abb.6).
Probe 23 bestand aus einem unverwitterten Stück des gleichen Steines.
Probe 24 entstammt einem anderen Block der Mauer, der mehr zellig-löcherige Verwitterung zeigte. Hier liegt die Verwitterung wohl vor allem in der Struktur des Steines, wie die chemische und biologische Analyse zeigt. Allerdings war der Verband stark gelockert, und die abgeschlagenen Teile ließen sich mühelos mit der Hand brechen im Gegensatz zu dem Material von Probe 23.

Proben 25 und 26:

Beide Proben wurden an der Quaderkalkverkleidung der Psychiatrischen Klinik in der Füchsleinstr. entnommen.(Erbaut 1893) Diese Wand liegt z.T. im Schatten von mehreren Bäumen und dem Treppenvorbau und ist relativ feucht. DiePsychiatrische Klinik liegt im Durchzugsbereich der hauptsächlichen Talwinde, die gegen die Schweinfurter Straße über den Komplex des Luitpoldkrankenhauses hinziehen. Die Plattenverkleidung wies eine 3-4 mm mächtige Aschen-Kalkkruste auf, deren Unterseite durch nicht völlig verwitterten, ev. neuverfestigten Kalk gebildet war. Die Kruste war bis zu 6 cm

Abb.5: Muschelkalkmauer in der Weißenburgerstr. Der Einfluß der Exposition ist deutlich zu sehen.

Abb.6: Muschelkalkmauer in der Weißenbuergerstr. Entnahmestelle. Keine Flechten sondern Salzausblühungen.

von der Wand abgeblaht und zerfiel in große Scherben (Abb.7). Unter der Kruste befand sich eine staubige bis schuppige Verwitterungszone, die sich mit dem Spatel leicht abschaben ließ.
Probe 25 ist die zersetzte, staubige Schicht unter der sich ablösenden Kruste.
Probe 26 ist das Krustenmaterial selber.

Abb.7 : Plattenverkleidung der Psychiatrischen Klinik (Probe 25)

Proben 27, 28 und 29:

Schaumkalkblöcke aus einer Ruinenmauer, die heute die se. Begrenzung der Staatlichen Bakteriologischen Untersuchungsanstalt bildet. Diese Schaumkalkblöcke aus dem Unteren Muschelkalk (Wellenkalk) bildeten eine dichte oolithnische Masse, die im unverwitterten Zustand sehr hart war. Infolge eines Artillerietreffers ist einer der Blöcke 2o cm tief aufgelockert. Kleine Schüppchen ließen sich parallel der Schichtflache abheben. (Bei der Quaderkalkverwitterung treten

die Schüppchen im allgemeinen parallel der Oberfläche auf).
Nr.27 besteht aus kleinen Schüppchen des Blockes mit dem Artillerietreffer.
Nr.28 ist das darunter befindliche feste Material.
Nr.29 entstammt dem benachbarten, nicht so tief verwittertem Block, der auch äußerlich noch frische Farben zeigte. Er ließ sich aber leichter zerkleinern, als 27 und 28.

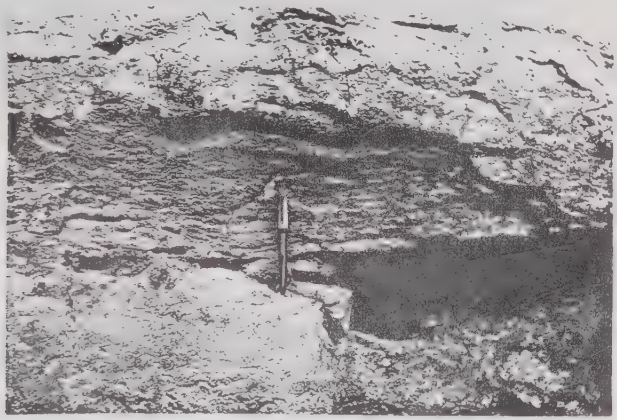

Abb. 8 : Schaumkalkblöcke mit Artillerietreffer.

Proben 30 -34:

Alle Proben wurden an der Adalberokirche entnommen (erbaut. 1896-99). Es sollte die Verteilung der Mikroflora an verschiedenen Punkten des gleichen Gebäudes mit gleichen Gesteinen untersucht werden. Dabei wurde Exposition und mikroklimatischer Bereich berücksichtigt.
Alle Proben bestehen aus Quaderkalk in mehr oder weniger verwittertem Zustand.
Probe 30: Staub- und Aschenkruste an der Kehle des rechten

Löwen am NE-Portal. Die Aschenkrusten und die puderige Zwischenzone (Kieslinger,1932) konzentrieren sich auf den Bereich des unter der Kehle ablaufenden Wassers und sind am kräftigsten entwickelt dort,wo schützende Überhänge vorhanden sind. Die staubige Zwischenschicht ist manchmal verhärtet, manchmal fehlt sie auch völlig.

Probe 31 stammt von der NW-Ecke der Kirche. Regen und Wind halten hier die Fassade sauber und vermindern die Krustenbildung. Hohlräume und Ritzen können sich nicht mit anorganischem oder organischem Material füllen. Es bildet sich kein günstiger Nährboden, ebenso wird die Feuchtigkeit schnell vom Wind verdunstet. Anzeichen von Verwitterung sind kleine Kalkschüppchen, die sich mit dem Spatel ablösen lassen. Diese kamen zur Untersuchung.

Probe 32 kommt von einem Mauerteil unmittelbar über einer Simsleiste. Der Fall, daß die stärksten Verwitterungsspuren nicht unter einer Kehlung,sondern über einem Vorsprung zu finden ist, ist selten. Hier ist deutlich zu sehen, daß das Spritzwasser, das vom Sims hochspringt, einen starken Einfluß auf die Partie darüber hat. Das auf dem Sims stehende Wasser steigt ebenfalls einige cm durch Kapillarität empor. Krusten können sich infolge der heftigen Verwitterung nicht bilden.

Probe 33 kommt aus einer geschützten,nach E geöffneten Nische des Chores. Hier sind die Gebäudeteile am stärksten und großflächigsten geschwärzt, Krustenbildungen sind dabei häufig und bestehen zu großem Teil aus exogenem Material. Die Kruste schließt das Gestein ab,und unter der Kruste kommt es zu Salzbildungen, die die Krusten dann aufsprengen. Säulen-

Abb.9: Löwe von der Adalberokirche (Probe 30).

Abb-10: Simsleiste an der Südseite der Adalberokirche (32).

füße sind wegen des Wasserstaus am heftigsten angegriffen.
Probe 34 stammt von einer Säulenkante an der Ostseite des Chores aus größerer Höhe (3,5 m). Windschutz und fehlende Sonneneinstrahlung erlauben, daß sich viel Material auf den Bausteinen sammelt und die Feuchtigkeit tief einzieht. Die Kanten sind besonders anfällig, da hier die Einflüsse der Feuchtigkeit und der wandernden Salzlösungen sich addieren und die Festigkeit des Gesteines am geringsten ist.
An diesen Stellen platzen lange Leisten bis 2 cm Mächtigkeit ab, und darunter kommt eine bis 5 cm tief reichende Aufarbeitungszone zum Vorschein. Das Material wurde unter einer der abplatzenden Leisten entnommen.
An allen Gebäudeteilen, die zur Untersuchung kamen, wurden weder Flechten noch Algen mit dem bloßen Auge festgestellt.

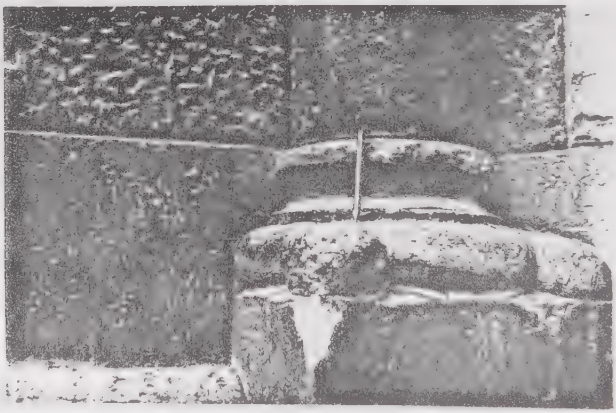

Abb.11: Säulenfuß von der Ostseite der Adalberokirche (33)

Probe 35:

Quaderkalk von der Treppe des Neumünsters (erbaut 1710-1716). Der Eingang unter der Treppe der Kirche besitzt einen gemauerten Bogen aus Quaderkalk. Es bilden sich Salzausblühungen und der Kalk schuppt ab. Die Mauer ist nach W. exponiert. Das Treppenpodest wirkt scheinbar als Auffangfläche für Regenwasser, das dann in die Mauer einsickert. Der Kalk ist zu jeder Tageszeit feucht und war bei jedem Besuch feuchter als die umliegenden Gebäude. Am Tage der Probenahme war allerdings heißes Sommerwetter, sodaß die ermittelte Feuchtigkeit unter dem normalen Wert liegen dürfte. Der Chloridgenalt der Probe rührt wahrscheinlich von im Winter gestreuten Salz her.

Proben 36 und 37:

Muschelkalkmauer an einem Gehöft in Büchold an der Straße nach Hammelburg. Der Hof steht an einem Hang. Die sich in der Mauer bewegende Feuchtigkeitsfront verläuft jedoch nicht hangparallel sondern horizontal. Auf der Höhe des Hanges befindet sich der Kapillarsaum ca 50 cm über dem Erdboden, am Hangfuß des Gebäudes bereits in 1,7 m Höhe. Die Wasserbewegung hat demnach nicht nur eine vertikale sondern auch eine horizontale Komponente. Exposition: SE. Entnahme in 1, 5 m Höhe aus dem Kapillarsaum.

Probe 36 ist verwittertes,staubfeines Material.

Probe 37 entstammt dem Kern des Muschelkalblockes, der noch völlig intakt schien.

Proben 38 und 39:

Quaderkalkblock von der Hofmauer der "Traube" in Thüngersheim (erb. Ende des 16. Jhdts.).

Die Mauer ist aus den verschiedensten Gesteinstypen erbaut.

Alle Blöcke sind bereits abgerundet und zeigen schwere Verwitterungsschaden, die wohl vor allem auf das große Alter und die freie Lage zurückzuführen sind, wie die mikrobiologische Analyse zeigt. Es wurden außer den Quaderkalkproben 38 und 39 noch eine Buntsandsteinprobe (81) und eine Mörtelprobe (87) entnommen. Der ausgewählte Quaderkalkblock zeigt starke Desquamationen im mm-Bereich. Die ganze Mauer ist bis zu 20 cm Höhe mit Algen bewachsen, in den Mörtelfugen sogar bis zu 60 cm Höhe. Andere Quaderkalkblöcke zeigten leichte Salzausblühungen, der Mörtel war völlig gelockert und sandete aus. Die ganze Mauer wurde ein halbes Jahr nach der Probenentnahme neu verputzt mit Zementanwurf.

Probe 38 sind kleine abschabbare Kalklamellen, denen wenig Salz beigemengt war.

Probe 39 ist das darunter befindliche feste Gestein, das im Labor abgeflammt wurde.

Abb. 11a Quaderkalk und Buntsandstein von der Hofmauer der "Traube" in Thüngersheim.

Proben 40 und 41:

Quaderkalk von der Tordurchfahrt des Rathauses in Marktbreit. Der ganze Komplex entstand in der Spätrenaissance (erb.1609. Die Blöcke,aus denen die Tordurchfahrt gefügt ist, haben stark vertiefte Fugen,und die Verwitterung greift besonders an den Kanten und seitlichen Partien an. Die Proben wurden in 1,5 m Höhe über der Straße entnommen. Die Orientierung ist NE. Algen oder Flechten sind nicht vorhanden.

Probe 40 ist lockeres Staubmaterial- leicht verkrustet- von einer Blockaußenkante, das mit dem Skalpell entfernt wurde.

Probe 41 entstammt dem Kern eines faustgroßen Brockens, der im Institut vor dem Zerkleinern abgeflammt wurde.

Proben 42 und 43:

Mauer an der Eremitenmuhle in Veitshöchheim, in einem schmalen Durchgang zum Main. Die freistenende Gartenmauer ist aus kleinen Blöcken von Muschelkalk der Normalfazies aufgebaut, in denen reichlich Toneinlagerungen auftreten. Die Mauer ist stark verwittert und dem Anschein nach mindestens 200 Jahre alt. Sie wurde bereits zum Zeitpunkt der Probennahme in ihrem unteren Teil mit Zementmörtel verputzt. Die stärkste Verwitterung zeigt die Mauer in der Höhe zwischen 1,25 und 1,7 m. Ein stark verwitterter,kleinerer Block wurde entnommen.

Probe 42 besteht aus abschabbaren Lockermaterial, das z.T.aus Kalkstaub, z.T. aus Tonschüppchen zusammengesetzt ist.

Probe 43 ist das Kernmaterial, das nach Entfernen der stark verwitterten Teile abgeflammt und dann zerschlagen wurde.

Proben 46 und 47:

Werksandsteinproben von der Unterkante eines Fenstersimses der Ruine des Bechtolsheimer Hofes in der Kettengasse- Hofstr. (erbaut Ende des 17. Jahrhunderts). Das Gestein sandet sehr stark ab. Die Verwitterung ergreift zuerst die Unterkanten der Simse. Eine oberflächlich verkrustete Partie, bei der noch Spuren der Behauung zu erkennen sind, liegt locker auf einer stark absandenden Zone, unter der immer festeres Gestein folgt. Interessant ist die Beobachtung, daß die Verwitterung unter den kleinen Notdächern, die über den Simsen des ersten Stockes angebracht sind, besonders stark entwickelt ist, also nachweislich in diesem Umfang erst nach Kriegsende begann. Diese Beobachtung ist an mehreren Bauten im Stadtgebiet zu machen. Die Feuchtigkeit hält sich länger im Schatten dieser Dächer und kann so bessere Voraussetzungen für die Verwitterung schaffen.

Probe 46 ist unter der Kruste abgeschabter Grus.

Probe 47 ist eine Leiste festen Materials, die den Grus als Kruste überdeckte.

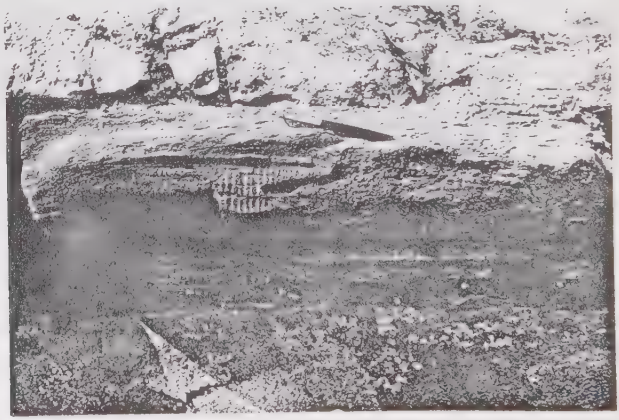

Abb.12:
Zu Probe 46

Proben 48 und 49:

Portal des Geologischen Institutes (erb.1902), Exposition: SSE. Der Sockel der Portalfassung aus Werksandstein zeigt intensive Verwitterung im Bereich des aufsteigenden Kapillarwassers. Es bilden sich Salzausblühungen. Ansätze zu Krustenbildung sind vornanden,werden aber im Gegensatz zu den Krusten an Fenstersimsen immer wieder abgesprengt.Die Verwitterung ist äußerst intensiv.

Probe 48 ist oberflächlicher,leicht abschabbarer Grus, mit Salzen vermengt.

Probe 49 ist darunter befindlicnes,festes Material, das sich allerdings in der Hand zerbrechen ließ.

Proben 50 und 51:

Portal der Psychiatrischen Klinik an der Füchsleinstr. (Vergleiche auch Proben 25 u.26). Der Säulensockel aus Werksandstein ist ähnlich angegriffen wie in Proben 48 und 49. Da die Kapillarerscheinungen und die Salzausblühungen völlig ähnlich wie am Geologischen Institut sind,erklärt sich der höhere Gehalt an Bakterien und Pilzen ev. durch die nahe stehenden Bäume und Büsche, die mehr organisches Material liefern. Einen Einfluß mag der Umstand haben, daß die Klinik gelegentlich in den Einfluß der Grenze der Inversionsschicht über dem Tal gerat, an der sich die Aschen- und Staubpartikel bei Nebellagen besonders anreichern.

Nr. 50 ist oberflachlich abgeschabter Grus.

Nr. 51 ist darunter befindliches festes Material.

Die Exposition kann keinen Einfluß auf die Mikroflora haben, da auch dieses Portal nach S orientiert ist. Algen oder Flechten kamen nicht vor.

Probe 52:

Absandende Partien eines Werksandsteinblocks von der Mauer der Städtischen Gaswerke direkt unter dem Schornstein. (Vergl. Proben 7 und 8). Der Bereich ist teilweise mit Aschenkrusten bedeckt, unter denen das Gestein noch heftiger zerfallt. Auch die Betoneinfassungen des Abwassergrabens sind verwittert. In der ganzen Region des ehemaligen Gaswerkes und des Bahnhofes sind die schwärzlichen Staub-Aschekrusten bedeutend verbreiteter als in den übrigen Teilen der Stadt. Außer einem höheren Anteil an organischem Material und stärkeren Abweichungen von der durchschnittlichen chemischen Zusammensetzung der Extrakte lassen sich jedoch keine großen Unterschiede gegen Sandsteinverwitterung ohne Aschenkruste herausstellen.

Proben 53 und 54:

Werksandstein eines Gesimses an der Ruine Ecke Kaiserstr. (erb. um 1920). An der Unterseite des Gesimses, an Fensterumrahmungen und besonders auch an den Buntsandsteinquadern des Sockels sind starke Verwitterungsspuren. Es bilden sich grobe absandende Flächen, die teilweise noch mit einer Deckplatte oder Leiste überzogen sind. An einigen Stellen zeigt sich ein mehrfacher Zyklus von Verkrustung und darunter arbeitender Verwitterung.

Probe 53 ist Material einer Deckleiste.

Probe 54 ist sandiger Grus aus einer Zwischenschicht.

Proben 55 und 56:

Werksandsteinfenstersims vom Hof Emeringen. Nähere Umstände wie Proben 15,16 und 17.

Probe 55 ist Sandgrus von einem Sims in 1,5 m Höhe.

Probe 56 ist festeres Material unter der absandenden Schicht.

Probe 57:

Fester, makroskopisch unverwitterter Werksandstein vom Monument der Unterfränkischen Gesteinsindustrie (1964) am linken Mainufer unterhalb der Friedensbrücke. Das Material ist noch völlig unversehrt. Es wurde an der Oberkante des 2. Blockes von unten entnommen. Trotz der relativ kurzen Zeit, die das Material in der Stadt ist, überflügelte die Mikroflora weit die Werte, die im Steinbruch üblich sind.

Proben 58, 59 und 60:

Werksandsteinmaterial vom physiologischen Institut am Röntgenring. (Erbaut 1887). Am Portal des Institutes wurden im Oktober 1965 ca. 15 cm des stark verwitterten Sandsteines abgemeißelt und nach 2-3 Monaten mit einer frischen Plattenverkleidung versehen (Abb.25 u.26).

Probe 58 wurde 4 Tage nach Beendigung der Meißelarbeiten am nunmehr anstehenden Material entnommen und biologisch und chemisch untersucht. Es zeigte sich keine Verwitterung, weder im Chemismus noch in der Mikroflora.

Probe 59 wurde nach 4 Wochen entnommen.

Probe 60 wurde 11 Wochen nach dem Abmeißeln und kurz bevor die Platten angebracht wurden, entnommen.

Weiter konnte die äußerst rasche Entwicklung der Mikroflora auf diesem Gestein nicht verfolgt werden.

Das rasche Ansteigen der Keimzahlen bei diesen Proben, und der relativ hohe Wert der Probe 57 und der Probe 5 im Gegensatz zu den Proben 76 und 77 aus Werksandsteinbrüchen, sind einer der Beweise für den Einfluß der Stadtatmosphäre auf die Entwicklung der Mikroflora auf und in Bausteinen. Es sei jedoch erwähnt, daß bei der heftigen Verwitterung am Portal der Kapillarsaum eine erhebliche Rolle spielte.

Proben 61, 62, 63 und 64, 65, 66:

Das Material dieser Proben stammt aus dem Innenhof des Kleinmaidbronner Hofs in der Bronnbacher Gasse gegenüber dem Bronnbacher Hof.(erb.1712-14). In 3,5 m Höhe am s. Portalbogen sind abwechselnd Werksandsteinblöcke und Buntsandsteinblöcke verbaut. Beide Steinarten, undzwar an allen Seiten des Hofes,zeigen die gleichen Verwitterungserscheinungen. Ein Einfluß des Gesteins und der Himmelsrichtung kommt also nicht in Betracht.
Die Verwitterung ist hier äußerst weit fortgeschritten und ist sicherlich durch Brandeinwirkung während der Bombennacht stark beschleunigt worden. Allerdings lassen sich bei diesen Sandsteinen Brandschäden nicht ohne weiteres von normaler Verwitterung unterscheiden (KIESLINGER, 1932 p.125).
Es wurden von jedem Gestein 3 Proben entnommen.
Probe 61 (Werksandstein) und 64 (Buntsandstein) entstammen der oberen festen Kruste, die noch deutlich die Scharrierspuren des Steinmetzen zeigt.
Probe 62(We-sdst.) und 65 (Buntsdst.) entstammen der absandenden,staubigen Zwischenschicht unter der Kruste, wenn diese nicht schon abgeplatzt war.
Probe 63 (Werksdst.) und 66(Buntsdst.) bestehen aus makroskopisch gesundem Gestein unter der Zwischenschicht. An manchen Stellen hatte sich unter der abgeplatzten 1. Kruste und der Zwischenschicht bereits eine neue Kruste und neue sandige Zone entwickelt. Die obersten Partien wurden mit dem Skalpell und Meißel entfernt, um wirklich relativ frisches Material zu bekommen. Die Verwitterung reicht hier bis zu 8 cm in das Gestein. Die Mikroflora war abnorm durch ein völlig einmaliges Vorherrschen der Pilzflora.

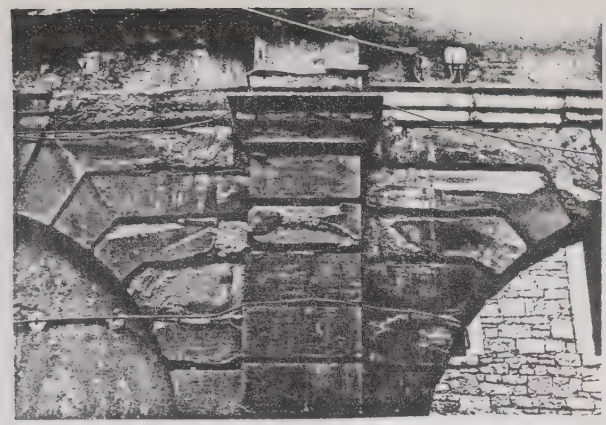

Abb. 13: Kleinmaidbronner Hof in der Bronnbacher Gasse. Abwechselnd verbauter Werk- und Buntsandstein.

Proben 67, 68 und 69:

Fenstersturz aus Werksandstein an der zum Main gelegenen Fassade der enemaligen Luitpoldhallen. Nach S exponiert, aber schattige Lage unter Bäumen, die vor dem Gebäude stehen. Es wurden ebenfalls Proben aus drei Schichten entnommen.

Probe67 ist die deckende, verkrustete Leiste, an deren Oberfläche noch Bearbeitungsspuren zu sehen sind.

Probe 68 ist der sandige Grus der Zwischenschicht.

Probe 69 entstammt dem noch relativ unverwitterten Kern der Fensterleiste und wurde vor dem Zerkleinern abgeflammt.

Flechten und Algen fanden sich sporadisch auf dem Verputz der Wand, nicht aber auf den Fenstersimsen, die früher einen Farbanstrich besaßen, der die Verwitterung beschleunigte. Interessant ist die Beobachtung, die an mehreren Stellen gemacht wurde, daß die Mikroflora die höchsten Zahlen nicht

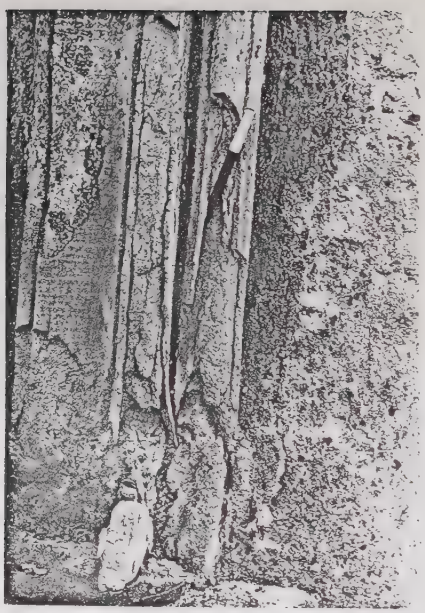

Abb.14:
Werksdst. vom
Fensterrahmen
der Luitpoldhalle
(Proben 67-69).

Abb.15:
Putte aus dem
Residenzgarten
(Proben 70-72).

in der sandigen Zwischenschicht, sondern in den noch zusammenhangenden Partien den höchsten Wert erreicht. Dies kann eventuell auf bessere Feuchtigkeitsbedingungen des zusammenhängenden Gesteins zurückgeführt werden. Möglicherweise spielt auch eine Änderung des pH- und Eh-Bereichs eine Rolle, oder die völlige Erschöpfung an Nährstoffen in der sandigen Zwischenschicht, in der sich Quarz und unlösliche Alumosilikate immer mehr anreichern.

Proben 70,71 und 72:

Alle drei Proben entstammen einer Putte an der NE-Balustrade des Hofgartens. Nach Aussage der Schlösser- und Gartenverwaltung kann es sich um ein Original oder eine frühe Replik handeln. Diese Putte zeigt besonders heftige Verwitterungserscheinungen an ihren NNE-exponierten Stellen. Die Brust- und Bauchpartie wurde schon vor längerem mit Zement ausgebessert, wobei ein noch intaktes Stück ummörtelt und dann mit einer Zementhaut überzogen wurde. Diese Partie verwitterte dann besonders stark und bildete ein ovales Loch. An der Oberkante der Ausbesserung drang die Verwitterung an der Trennstelle zwischen Stein und Mörtel verstärkt ein. Man erkennt deutlich (a) die Umrandung und (b), daß die Bahn des vom Kinn ablaufenden Wassers sich genau mit der Ausbesserungsgrenze deckt. Starke Verwitterung zeigen ebenfalls die Partien unter dem Ohr, der Achsel und in Faltenvertiefungen. Flechten- und Algenwuchs tritt nur auf den horizontal und nach Süden der Sonne exponierten Flächen auf.
Es wurden wegen zu geringer Materialmenge nur biologische Untersuchungen gemacht und bei diesen die Ansatzmenge der Verdünnung 1: 10 auf 5 g/ 45 ml Wasser reduziert.

Probe 70 ist Material, das in der Konsolhohle abgeschabt wurde.

Probe 71 ist Material vom Sockel der Figur aus Werksandstein, der auf dem Quaderkalkpodest steht. Es stammt aus einem Kapillarsaum, der sich über dem fast undurchlässigen Quaderkalk bildet.

Probe 72 ist unverwittertes Material von der S-Seite der Figur, die Flechtenbewuchs zeigt. Es wurde eine Stelle gewählt, an der keine Flechte auf dem Gestein aufsitzt.

Proben 73 und 74:

Verwitternder Werksandstein von der Grabkapelle in Iphofen. Exposition NW. Das Gestein sandet oberflächlich stark ab. Die sandige Zwischenschicht unter ebenfalls vorhandenen Krusten ist bis zu 3 cm mächtig.

Probe 73 entstammt der Zwischenschicht.

Probe 74 ist eine unter Kruste und Zwischenschicht befindliche gebleichte Zone, die aber noch völlig fest ist. Der Gesamteisengehalt beider Proben ist relativ niedrig.

Probe 75:

Verwitterndes, abgrusendes Material von der Pieta an der Lengfelderstr. in Versbach. (errichtet Ende des 18.Jhdt.) Die Pieta steht auf einer Gartenmauer ohne Schutzdach und ist sehr stark verwittert und ausgebessert. In den Falten des Mantels grust das Gestein ab. Die Sonnenexponierten Stellen weisen eine verfestigte Kruste auf, die bis zu 3 cm Tiefe ausgetrocknet ist. Unter dieser abplatzenden Kruste ist eine feuchte Zone. Von der Unterzone und der trockenen Kruste wurden Gesamtkeimzahlen bestimmt (Sommer 1966).

Abb. 16:
Pieta an der
Lengfelderstr.
in Versbach.

Die Kruste enthielt 1 200 000 Keime, die feuchte Unterzone 14 000 000 Keime. Die Verwitterung sowie die Salzbildung findet also in der Tiefe an der Grenze der eindringenden Feuchtigkeit, wo sie sich am langsten halt ,statt. Die Probe aus der Mantelfalte, die völlig untersucht wurde, hatte bereits in der äußeren Zone einen höheren Wassergehalt, da die Falte Schatten gab.

Probe 76:

Anstehendes Werksandsteinmaterial aus einem Werksandsteinbruch bei Gnodstadt (AUST, 1963). Der Bruch wird noch sporadisch betrieben. An der sehr dunnen, dunkelverfärbten Kruste an der Oberflache des Probematerials war jedoch zu erkennen, daß diese Probe schon mehrere Jahre der Atmosphare ausgesetzt war. Die Probe wies an der Oberflache sehr schwachen Algenwuchs auf, wurde aber im Labor abgeflammt,

sodaß nur in das Gestein auf Spalten eingedrungene Algen überlebten.

Probe 77:

Anstehender Werksandstein aus dem Bruch bei Herrnsheim (Krumbein, 1963). Der Bruch liegt seit über 10 Jahren still. Das Gestein zeigte an der Entnahmestelle keine Verwitterungserscheinungen. An anderen Stellen bildeten sich aber Tapeten aus sternförmig angeordneten Aragonitkristallen. Diese Kristalle können aber auch aus an der Wand ablaufenden Lösungen kristallisiert sein, da über dem Sandstein Kalkbänke anstehen (KRUMBEIN, 1963 p.43).

Probe 78:

Buntsandsteinmaterial von den Säulen der Neumünsterfassade (erb. 1627). Exposition: W. Das Material wurde am Säulenfuß links vom Portal entnommen, der stark mit Taubenkot verschmutzt ist. Der Buntsandstein macht trotzdem einen völlig frischen Eindruck. Risse und Abblatterungen verlaufen nicht parallel der Oberflache, wie allgemein bei der Verwitterung, sondern parallel der Schichtung. Ebensowenig beeinflußt zeigt sich der Werksandstein an der Schönbornkapelle, die ebenfalls von Taubenkot beschmutzt ist. Es sollte untersucht werden, ob die gesteinsbewohnende Mikroflora stark vom Taubenkot beeinflußt wird.

Proben 79 und 80:

Türportal aus Buntsandstein von einem Pavillon im Garten von Veitshöchheim.(erbaut 1768).
Der Buntsandstein sandet feinschuppig ab, ist von äußerst

feinkörniger Beschaffenheit. Die Glimmer halten sich länger an der Oberflache als die schwereren Quarze. Die Entnahmestelle lag im Schatten von Baumen. Am linken Türpfeiler ist das Gestein deutlich durch absteigende Lösungen entfarbt.
Probe 79 ist feinschuppiges Material von der Oberflache des Sturzes.
Probe 80 ist ein größeres noch festes Stück der darunterliegenden Zone, das gesäubert und sterilisiert wurde.

Probe 81:

Absandendes Buntsandsteinmaterial von der Hofmauer der "Traube" in Thüngersheim. Nähere Umstände wie bei Proben 38 u. 39 beschrieben. Unverwittertes Material wurde nicht entnommen.

Proben 82 und 83:

Balustrade des Treppenaufganges zum Huttenschloß in Steinbach bei Lohr (erbaut 1725-28 nach Plänen von Baltnasar Neumann). Die Saulen bestenen aus Buntsandstein. Die Verwitterung dringt entlang der Schichtung in das Säuleninnere vor. Exposition:NW. Kein Algen-oder Flechtenbewuchs. Diese sind auf den horizontalen Flächen des Geländers in geringer Zanl vornanden.
Probe 82 ist mit dem Skalpell aus den Ritzen geholtes feines Sandmaterial.
Probe 83 ist makroskopisch unverwittertes Material von der benachbarten Spaltenwand, das äußerlich sterilisiert wurde.

Proben 84 und 85:

Süßwasserkalk von der Mauer des Nationalmuseums in München (erbaut 1894-99). Die Mauer, die recht-

winklig von der Prinzregentenstraße abzweigt, ist nach NW orientiert. Sie besteht aus einem zelligen Süßwasserkalk und verwittert unter Vergrößerung der natürlichen Hohlräume. Die Wände zwischen den Höhlungen sind stellenweise aufgeweicht.
Probe 84 ist Material von den mit der Hand oder dem Skalpell lösbaren aufgeweichten Verbindungswänden.
Probe 85 besteht aus völlig hartem Material, das mit Hammer und Meißel gelöst werden mußte.

Probe 86:

Am Grabenberg unterhalb des CC-Filmtheaters befinden sich auf einer Muschelkalkmauer cm-mächtige Salzausblühungen. Die Salze wurden steril entnommen, blieben aber leider mit etwas verwitterndem Muschelkalkmaterial vermischt, das sich nicht steril entfernen ließ. Für Salzanalysen sei auf KESSLER (1960) verwiesen.

Probe 87:

Zerfallender Mörtel mit Algenbewuchs von der Mauer der "Traube" in Thüngersheim. Für Einzelheiten vergl. Proben 38 und 39. Die Probe wurde in 60 cm Höhe entnommen.

Probe 88:

Muschelkalkboden aus dem Schuttkegel eines aufgelassenen Bruches in Versbach. Der Boden war mit wenig Gras und Unkraut bewachsen.

Probe 89:

Bodenmaterial aus dem Schuttkegel des Werksandsteinbruches bei Herrnsheim. Der Boden besaß keine Makroflora. Der Schutt ist stark mit Tonen des Lettenkeupers vermengt.

Probe 90:

Boden, der hinter der Mauer des Schlachthofes, von der die Proben 11 und 12 entnommen wurden, ansteht. Entnommen wurde 1 kg aus 50 cm Tiefe. Untersucht wurde nur die Mikroflora des Schwefelkreislaufes, um zu sehen, ob - ev. durch Einflüsse von Heizkraftwerk und Gaswerk- diese Keime in größerer Zahl vorhanden sind als in normalen Böden. Die Zahlenwerte liegen bedeutend höher als in den untersuchten Böden aus Steinbrüchen. Ähnlich hohe Zahlen werden von POCHON u. CHALVIGNAC (1964) von Weinbergsböden zitiert, die mit Kupfersulfat angereichert waren.
Hier leiten sich die hohen Zahlen wohl von dem Schwefelgehalt der Luft her.

VII

DISKUSSION DER ERGEBNISSE

In der Diskussion der Ergebnisse wird den einzelnen Untersuchungsbereichen gefolgt, wobei die Ergebnisse der einzelnen Analysen, wenn nötig, berücksichtigt wurden. In einer Zusammenfassung, die der Arbeit vorangestellt ist, wurde bereits ein Überblick über die gewonnenen Daten gegeben.

A.) MIKROBIOLOGIE

1. Der Stickstoffkreislauf:

POCHON und BARJAC (1958 pp.72-172) geben einen Überblick über die einzelnen Fragen der Stickstoffumwandlung im Boden und der in der Bodenmikrobiologie üblichen Untersuchungsmethoden. Wenn es darauf ankommt, die Umwandlungen eines Elementes im Boden zu kontrollieren, werden immer Nährböden verwendet, die möglichst angenähert die pauschalen Reaktionen begünstigen, während die einzelnen beteiligten Arten zunächst von untergeordnetem Interesse sind. Die Darstellung des Stickstoffkreislaufes nach POCHON u. BARJAC (1958) und HAWKER et.al. (1960) gibt einen Überblick über das heutige Wissen und berücksichtigt bereits die Möglichkeit, daß auch NH_3 und nicht, wie man früher meinte, nur NO_3 von Pflanzen und Mikroorganismen assimiliert wird. Selbst in gesunden Böden kann das Gleichgewicht des Stickstoffkreislaufes stark nach einer Seite verschoben werden. Z.B. überwiegt in nassen und sauren Boden die Denitrifizierung. In einem Gestein, das ein weit extremeres Milieu darstellt,

kann diese Verschiebung auf eine Endstufe hin noch viel ausgeprägter sein. Nach den Ergebnissen der mikrobiologischen und chemischen Analysen liegt der Endpunkt bei den untersuchten Gesteinen bei den Nitraten. Das Fehlen von Stickstoff assimilierenden höheren Pflanzen macht dieses Ergebnis noch wahrscheinlicher. So kann es nicht verwundern, daß die Stickstoffoxydanten nach der Ammonifizierung die höchsten Keimzahlen erreichen.

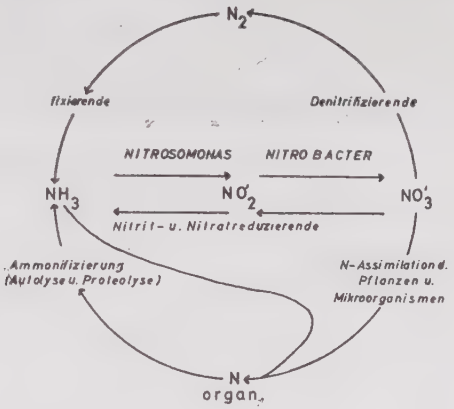

Abb.17: Stickstoffkreislauf nach POCHON und HAWKER et al.

a) Stickstoffbindung:

Stickstoffbindung trat auf allen untersuchten Gesteinen nur in ganz geringem Ausmaß auf. Sowohl aerobe, als anaerobe stickstoffbindende Keime blieben, von wenigen Ausnahmen abgesehen, auf die Verdünnung 10^{-1} beschränkt. Als aerobe Fixierer kommen vor allem Azotobacter und als anaerobe Clostridien in Frage, die in Böden weit

verbreitet sind. In den Gesteinen blieben bis auf die Proben 11,12, 50 u. 51 die Keimzahlen unter 20/g Trockenmaterial. Bei den genannten Proben kann ein Einfluß durch seitlich oder von unten eindringende Keime aus dem Boden angenommen werden. Die Keime auf den übrigen Proben, die in nur geringen Mengen auftraten, können Anflugkeime sein, die sich nicht weiter entwickeln.

Oligonitrophile Organismen, die ihren Stickstoffbedarf nicht allein aus der Luft beziehen können, aber scheinbar auch Luftstickstoff binden (z.B. einige Pseudomonasarten) konnten mit den verwendeten Nährböden nicht ermittelt werden.

Der zweite große Stickstoffbinder im Boden, die Rhizobien, kommen nicht in Betracht, da sie nur in Symbiose mit Leguminosen und einigen anderen Pflanzen vorkommen.

b) Ammonifizierung:

Die Ammonifizierung ist neben der Stickstoffbindung aus der Luft einer der entscheidensten Schritte der Stickstoffumwandlung im Boden, da durch diesen Prozeß der den Pflanzen nicht zugängliche, organisch gebundene Stickstoff freigesetzt wird.

Für die Mikroflora des nackten Gesteines ist sie, wie die ersten Arbeiten auf diesem Gebiet angeben (THIEBAUD u.LAJUDIE, 1963 und KRUMBEIN u.POCHON, 1964), ebenfalls von großer Bedeutung. Die Analyse einer so großen Zahl von Gesteinsproben, wie sie hier untersucht wurde, bestätigte im einzelnen die Ergebnisse der Einzelanalysen von THIEBAUD u. LAJUDIE (1963). Es findet also auf fast allen Gesteinen Ammonifizierung von organischem Material durch eine Vielzahl von heterotrophen Keimen statt. Dabei wird Ammoniak frei, der als Ausgangsmater-

ial für die oxydierenden Keime dient.
Es sind bisher 7 Wege der Desaminierung von stickstoffhaltigen organischen Verbindungen bekannt.
In den meisten Fällen handelt es sich um eine Hydrolyse, die Hand in Hand mit einer Decarboxylierung geht. Weiter ist reduktive und oxydative Desaminierung möglich, sowie Redoxvorgänge zwischen 2 Aminosäuren.
Bei diesen Abbauschritten wird neben Ammoniak Kohlensäure, eine Reihe von organischen Säuren und Alkohol freigesetzt.
Die bei der Desaminierung entstehenden Säuren können Lösungs- und Austauscheffekte mit vielen Mineralen erzeugen, desgleichen Ionen über den normalen Sättigungspunkt in Lösung halten (MANDL u.GRAUER,1952,1953).
Der freigesetzte Ammoniak entweicht in die Luft, geht in Lösung oder wird durch Mikroorganismen (oder Pflanzen) weiterverarbeitet. Ein kleiner Teil kann an die Huminfraktion gebunden werden, besonders wenn Tonkolloide vorhanden sind (POCHON u. BARJAC,1958 p.131-132). Da auf den untersuchten Gesteinen keine Makroflora existiert, wird samtlicher freigesetzter Ammoniak gelöst, weiteroxydiert oder verflüchtigt.
Die organischen Verbindungen, die durch die heterotrophe Gesteinsflora abgebaut werden, können (a) aus der Atmosphäre sedimentiert werden, (b) in den im Gestein zirkulierenden Lösungen aufsteigen oder (c) aus dem Gestein selber stammen. ABELSON,(1963) und DEGENS (1965) zeigen, daß Aminosauren und auch kompliziertere organische Verbindungen vom Zeitpunkt der Sedimentation an sich über geologische Zeiten im Sediment erhalten können und in den meisten Sedimenten nachweisbar sind.

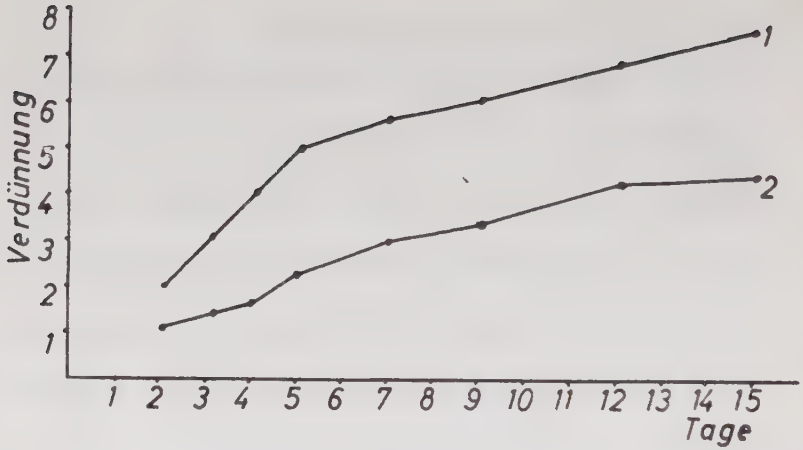

Abb.18: Ammonifizierung bei Kalken(1= verw. 2= unverwittert).

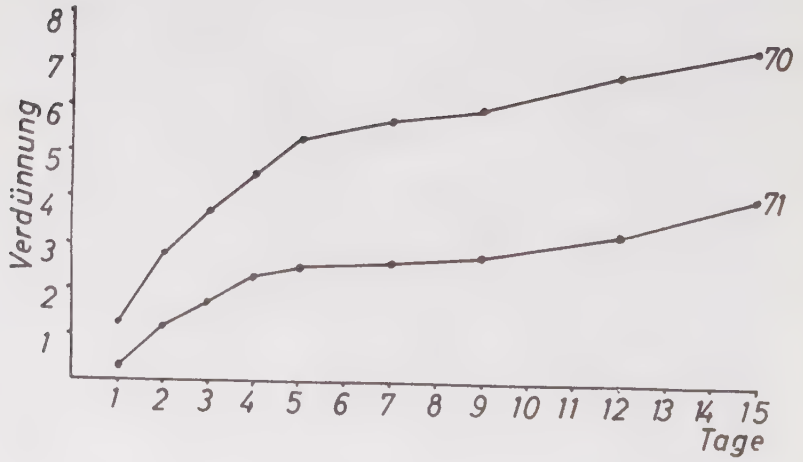

Abb.19: Ammonifizierung bei Werksandstein(70= verw.71= unverw.)

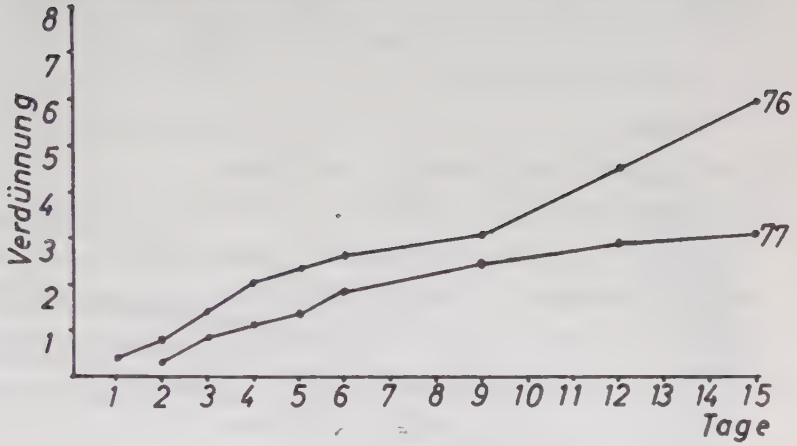

Abb.20: Ammonifizierung bei Buntsandstein. (Probe76= verwittert. Probe 77 = unverwittert).

Abb. 18,19 und 20 zeigen den Verlauf der Ammonifizierung bei drei verschiedenen Gesteinen. Die angegebenen Verdünnungen sind ungefähr mit 10^{x} Keimen/g Trockenmaterial gleichzusetzen. Die Nr.70 und 71 in Abb 19.entspricht den Proben 73 und 74, die Nummern in Abb.20 entsprechen den Proben 79 und 80. Bei den Buntsandsteinen verlief die Ammonifizierung im allgemeinen am sprunghaftesten und erreichte die niedrigsten Endwerte. Bei den Kalken verlief sie am ruhigsten und erreichte die höchsten Werte.Die Werksandsteine nahmen eine Mittelstellung ein. Diese Ergebnisse der Ammonifizierung sind wahrscheinlich vom pH-Wert des betreffenden Untersuchungsmaterials abhängig.

Bei der Integration aller ermittelten Kurven ergaben sich die folgenden Summenkurven, bei denen die Unterschiede zwischen den einzelnen Gesteinen stärker herauskommen.

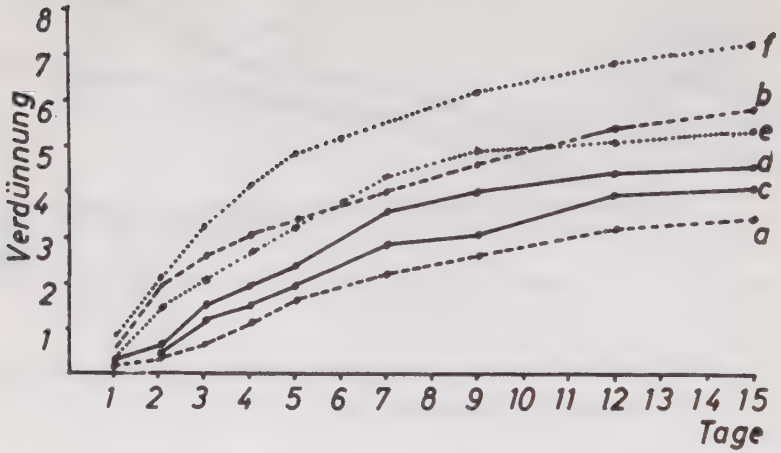

Abb.21: Integration aller Ammonifizierungskurven. Erläuterung: ····· = Kalke; ------ = Werksandsteine; _____= Buntsandsteine. a,c u.e = relativ unverwitterte Proben; b,d,und f = verwitterte Proben.

Die Differenz zwischen unverwittertem und verwittertem Material ist bei den Kalken besonders hoch, da diese am undurchlässigsten sind und die Infiltration von Keimen sehr langsam in die Tiefe vorschreitet. Andererseits erreicht die Mikroflora die höchsten Werte, da der pH-Wert für Mikroorganismen am

günstigsten ist. Der Buntsandstein ist das besiedlungsfeindlichste Medium,und bei diesem Gestein ist am ehesten möglich, daß die Mikroflora- mit Ausnahme der Pilze- nur einen geringen Einfluß auf die Verwitterung hat. Bei einigen Proben zeigt sich deutlich, daß die Besiedlung durch Mikroorganismen, der mit dem bloßen Auge sichtbaren Verwitterung vorausgeht. Es zeigt sich kein wesentlicher Unterschied zwischen unverwitterter und verwitterter Probe. (z.B. 18 und 19). Um den Unterschied der Besiedlung zwischen Gesteinen im Großstadtgebiet und in ländlichen Gemeinden, der bei der Betrachtung der Proben 5,57, 58,59, 60,76 und 77 schon deutlich wurde, noch einmal herauszustellen,wurden alle Ammonifizierungskurven aus ländlichen Proben und aus Proben von Würzburg integriert. Abb.22. zeigt, daß auch in der Ammonifizierung erhebliche Unterschiede vorhanden sind. Das Nährstoffangebot vergrößert sich sprunghaft, sobald die Gesteine der Stadtatmosphäre ausgesetzt sind.

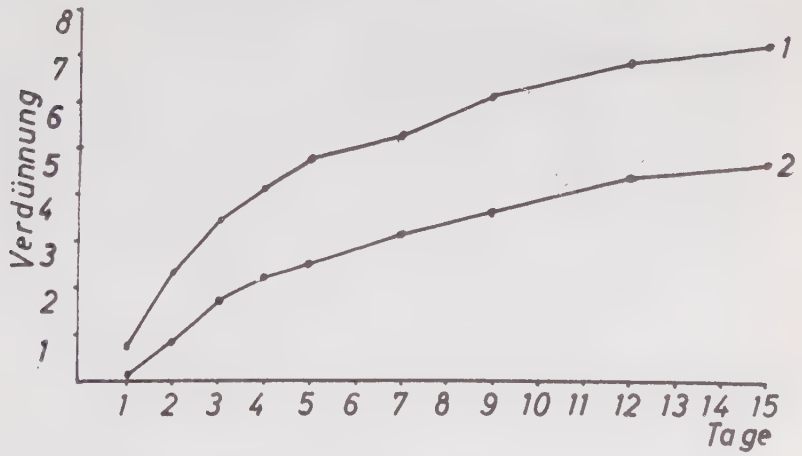

Abb.22: Ammonifizierung in der Stadt (1) und außerhalb (2).

c) Stickstoffoxydation:

Die autotrophe Oxydation von NH_3 zu NO_3 wird durch 2 Bakteriengruppen aus der Familie Nitrobacteraceae durchgeführt, deren Hauptvertreter bei der Oxydation von NH_3 zu No_2 Nitrosomonas ist, und bei der Oxydation von NO_2 zu NO_3 Nitrobacter. Die Ausgangssubstanz für die Oxydation ist daher in allen Fällen in genügender Menge vorhanden. So wundert es nicht, daß in zahlreichen Proben bedeutende Anzahl von autotrophen Keimen der Stickstoffoxydation nachgewiesen wurden. Der Nährstoff- und Energiebedarf dieser Organismen wird voll aus anorganischen Substanzen gezogen. Sie wurden von ihrem Entdecker WINOGRADSKI (1891) auch als chemolithotrophe Mikroorganismen bezeichnet.

Bei der Oxydation von Ammoniak werden wahrscheinlich folgende Stufen durchlaufen:

Ammoniak---------- Hydroxylamin

Hydroxylamin---------Hyponitrit

Hyponitrit----------Nitrit

Für die Umwandlung von Nitrit zu Nitrat bieten sich 2 Möglichkeiten an. Entweder findet eine Übertragung von Elektronen über ein Enzym mit Metallkern statt, oder ein Nitritmolekül wird hydratisiert und unter Wasserstoffabspaltung weiteroxydiert. Welcher Vorgang stattfindet, konnte bisher noch nicht eindeutig nachgewiesen werden.(POCHON u. BARJAC,1958) Bisher konnte erst die erste Stufe des Oxydationsweges nachgewiesen werden. Wenn der weitere Verlauf der Oxydation durch Harnstoffgaben genemmt wird, tritt im Nährboden gehäuft Hydroxylamin auf (HOFMAN u.LEES,1953). Die Oxydation läuft ebenfalls ab, wenn zellfreie Extrakte der Bakterien

verwendet werden. Dies ist ein weiterer Hinweis dafur, daß auch nach dem Absterben der Mikroorganismen Enzyme im Boden (und auch im Gestein) die einzelnen Stoffwechselvorgange weiterlaufen lassen (IMSHENECKI u.al. 1955). Als Kohlenstoffquelle wird Karbonat benotigt, in Form von CO_2 oder als Bikarbonat; als Stickstoffquelle kommt nur Ammoniak bezw. Nitrit (Hyponitrit) in Frage. Aminostickstoff wirkt in den meisten Fallen toxisch.

Für unsere Untersuchung wesentlich ist die gebildete Salpetersäure. KAUFFMANN (1953 u.54) weist an mit Anreicherungskulturen beimpften Gesteinsfragmenten nach, daß Keime vom Genus Nitrosomonas und Nitrobacter auch im Laborversuch fähig sind, Kalke oder Kalksandsteine mit kalkigem Bindemittel zu zerstören.

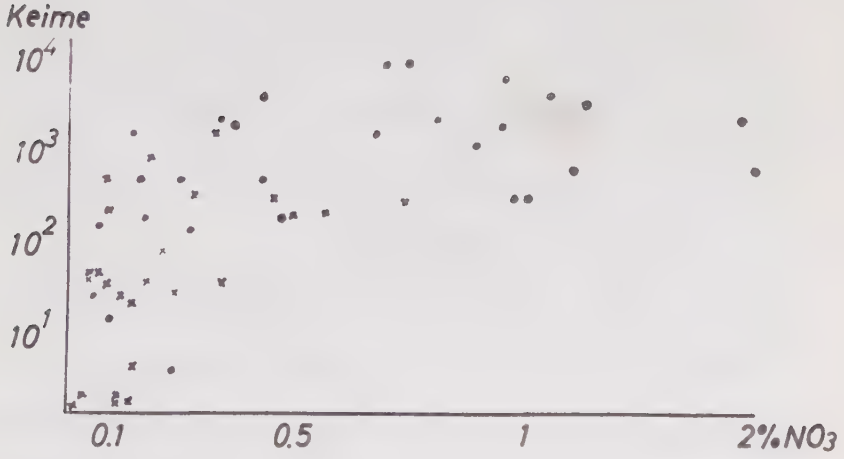

Abb.23: Relation zwischen Stickstoffoxydanten und Nitrat in Gesteinen. + = unverwittert; • = verwittert.

Abb.23 zeigt die Abhangigkeit der Zahl der oxydierenden Keime von den anwesenden Nitraten. Die Menge an nachweisbaren Nitraten ist proportional der Keimzahl. Eng verknüpft damit ist eine gleichzeitige Abnahme von CO_2 bei den Kalken, und eine Zunahme des wasserlöslichen Cà, das in Nitrate überführt wurde. Diese Umsetzungen haben 2 Folgen. 1. Wird der Gesteinsverband durch die Lösung der Karbonate gelockert. 2. reichern sich leichtlösliche Salze an, die ev. zu Salzverwitterung führen können.

In einigen Fällen wurden hohe Zahlen an Stickstoffoxydanten gefunden, ohne daß nennenswerte Mengen an NO_3 nachweisbar waren. Hierunter fielen sowohl noch relativ unverwitterte (frisch besiedelte) Proben als Proben, bei denen angenommen werden kann, daß die gebildeten Nitrate vom Regen oder aufsteigenden Lösungen ausgewaschen wurden.

Obwohl nur bei den Kalken eine Einflußnahme auf die Verwitterung im Laborversuch nachgewiesen wurde, ist es durchaus wahrscheinlich, daß bei den hohen Zahlen an N-Oxydanten, die auf den Sandsteinen auftraten , ein Einfluß der gebildeten Salpetersäure auf die Feldspäte und das tonige Bindemittel vorhanden ist. Ca und Mg werden in jedem Fall aufgeschlossen und liegen dann als Nitrate vor.

Die Buntsandsteinprobe (78), die stark mit Taubenkot beschmutzt war, zeigte keine abnorm hohen Keimzahlen, weder bei den ammonifizierenden noch bei den oxydierenden Keimen. Die Ammonifizierung lag allerdings etwas höher als der Durchschnitt der Buntsandsteinproben. Die Nitratwerte waren normal.

Ein Einfluß des Taubenkotes auf die Verwitterung ließ sich weder durch die biologische noch durch die chemische Analyse nachweisen.

d) Denitrifizierung:

Denitrifizierende Keime wurden in den untersuchten Proben nicht bestimmt.

Die Denitrifizierung über deren Ablauf und die dafür verantwortlichen Keime noch sehr ungenügend bekannt sind, verläuft im Boden proportional der steigenden Menge an organischem Material und der ansteigenden Feuchtigkeit. Maxima werden in nassen Schwarzerden erreicht (POCHON, 1958 p.167 etc.). Im Gestein herrschen nahezu entgegengesetzte Bedingungen, sodaß hohe Aktivitat von denitrifizierenden Keimen nicht zu erwarten war. Die gebildeten Nitrate werden also auf diesem Wege nicht abgebaut.

2. Der Schwefelkreislauf:

Seit der Entdeckung der biologischen Oxydation und Reduktion von Schwefelverbindungen durch BEIJERINCK (1895 u. 1904) sind zahlreiche Arbeiten über die in den Schwefelkreislauf eingreifenden Mikroorganismen erschienen

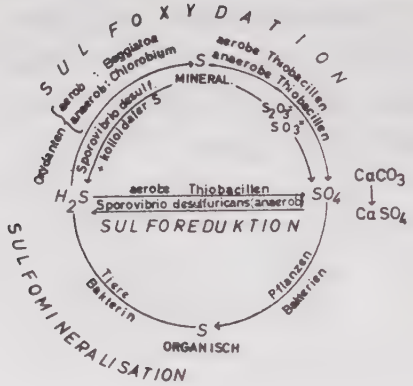

Abb.24: Schwefelkreislauf nach POCHON u.BARJAC (1958).

Abb. 24 gibt in einer schematischen Skizze einen Überblick über die beteiligten Organismen. Allerdings sind auch heterotrophe Bakterien und andere Mikroorganismen z.B. an der Oxydation beteiligt. KRUMBEIN u.POCHON (1964) isolierten einen Streptomyceten, der in großen Mengen im Gestein auftrat (2500/g) und im Laborversuch Schwefel oxydierte. Größere S-Gaben wirkten allerdings toxisch. Ach Pilze und verschiedene neterotrophe Bakterien können elementaren Schwefel oxydieren. Die Mineralisation von organischem Schwefel, also H_2S-Bildung

wird von einer ganzen Reihe von heterotrophen Keimen durchgeführt. Eingehende und zusammenfassende Arbeiten über die Schwefelspezialisten mit Angaben über Kultur, Physiologie und Taxonomie dieser Keime stammen von WAKSMAN (1922 etc,); BAAS-BECKING (1925); BAARS (1930); BUNKER (1936) BUTLIN u.POSTGATE (1953); PARKER (1953) und POSTGATE (1965).

Die autotrophen Schwefeloxydanten sind nach JANKE in BERGEY (1957) in die Familie THIOBACTERIACEAE eingeordnet, wobei die genera Thiobacterium und Thiobacillus am wichtigsten sind. Thiobacillus, von dem mehrere Arten bekannt sind, ist fur diese Untersuchung am wichtigsten, weil er der Mikroorganismus ist, der die höchste bekannte Säuretoleranz hat und erhebliche Mengen von Schwefelsäure produzieren kann.

Er verträgt (Thiobacillus thiooxydans) pH-Werte bis unter 1. HARMSEN (1938) beschreibt einen Fall,in dem die Wasserstoffionenkonzentration sosehr anstieg, daß negative pH-Werte erreicht wurden. Thiobacillus bezieht seine Energie aus der Oxydation von nicht vollstandig oxydierten Schwefelverbindungen. Der Kohlenstoffbedarf wird aus dem CO_2 der Luft oder aus Karbonaten gedeckt. (Ausnahme: der nicht strikt autotrophe Th. denitrificans). Als Stickstoffquelle kommt Ammoniak und in wenigen Fällen auch Nitrat in Frage. Nitrat wirkt auf Th. thiooxydans in größeren Mengen toxisch.

Über Fragen der im Laufe der Oxydation auftretenden Zwischenstufen berichten WAKSMAN,JOFFE u. BUNKER (1936) und BUTLIN (1953) neben anderen Autoren.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden keine Reinkulturen der Keime des Schwefelkreislaufes kultiviert, da die Oxydation und Reduktion auf Gesteinen sich besser mit Anreicherungskulturen oder über die Keimzahlbestimmung untersuchen lassen.

Es wurden geeignete Nährboden mit Gesteinsverdünnungen beimpft, um die Zahl der Keime festzustellen, die unter diesen Bedingungen sich entwickeln. Bestimmt wurden die Keimzahlen der autotrophen S-oxydanten, H_2S-oxydanten, der Keime, die SO_4 reduzieren und der S-mineralisierenden Keime.

a) Reduktion von Sulfaten:

Die ermittelten Werte zeigen, daß nur in einem kleinen Teil der Proben sulfatreduzierende Keime - d.h. anaerobe Keime vom genus Desulfovibrio- auftraten. Es waren die Proben 1,2,6,7,12,23,25,30,52,65,78,84,86,87. In fast allen Proben, in denen sie nachgewiesen wurden, blieben sie auf die Verdünnung 10^{-1} beschränkt. Das bedeutet, daß trotz der fast immer anwesenden Sulfate Reduktion nicht oder nur in geringem Umfang stattfindet und, ähnlich wie beim Stickstoffkreislauf auf den Gesteinen, die oxydierte Stufe die Endstufe ist.

b) Mineralisation von organischem Schwefel:

Keime, die unter anaeroben Bedingungen ohne Beigabe einer organischen Kohlenstoffquelle eine schwefelhaltige Aminosäure abbauen, sind in den Proben ebenso selten, wie die Sulfatreduzierenden. Sowohl die reduzierenden als die S-mineralisierenden Keime treten häufiger auf den Staub-Aschekrusten auf als in den Gesteinen selber. Sie sind in den Sandsteinen noch seltener als auf Kalken. Sie spielen keine wesentliche Rolle für die Erschließung von reduzierten Schwefelverbindungen. Die Schwefel-oxydierenden Keime müssen also ihre Energiequelle von außerhalb beziehen. Ein regelrechter Kreislauf

läuft nicht ab.

c) Schwefeloxydation:

Geprüft wurde auf Keime, die H_2S oxydieren, sowie auf Arten, die elementaren Schwefel und höher oxydierte Verbindungen zu Sulfat weiteroxydieren. Die Werte überschneiden sich teilweise, da es Keime gibt, die sowohl elementaren Schwefel, H_2S und Thiosulfate oxydieren können (z.B. Th.concretivorus, Th. neapolitanus).
In nahezu allen untersuchten Proben traten Keime dieser beiden Typen auf. Sie waren auf Kalken am zahlreichsten. Möglicherweise spielt das größere Angebot an Bikarbonaten dabei eine Rolle. H_2S-oxydierende Keime haben regional ein Maximum im NW der Stadt, wo die unmittelbaren Einflüsse von Heizkraftwerk und Gaswerk am stärksten sind. Ähnlich hohe Zahlen an Thiobacillen fanden bereits THIEBAUD u.LAJUDIE (1963) an Bauwerken in Paris und St.Cloud.
Über Zerstörungen an Bausteinen durch Thiobacillus gibt es bereits eine Reihe von Publikationen. ISACENKO (1930) u. PARKER (1947) berichten über Zerstörungen an Betonbauten. Mehrere Arbeiten über die Umwandlung von Kalk in Gips wurden von POCHON et al. (1947 etc.) veröffentlicht. In CORROSION of CONCRETE SEWERS (anonym,1959) wird auf den Einfluß von Thiobacillus und schwefelreduzierenden Keimen auf Drainageanlagen und Wasserversorgungssysteme in Südafrika hingewiesen.POCHON u. CHALVIGNAC (1964) zeigen, daß bei der Verwitterung der Tempel von Angkor (vergl. DELVERT, 1962) Thiobacillen beteiligt sein können. KRUMBEIN u. POCHON (1964) untersuchen den Zusammenhang des Auftretens hoher Zahlen von

Thiobacillus mit der Verwitterung der betreffenden Gesteine in verschiedenen Gegenden Frankreichs. Dabei zeigte sich, daß in besonders reichen Proben das kalkige Bindemittel eines Kalksandsteines quantitativ in Gips umgesetzt wurde.
Die Werte für schwefeloxydierende Keime und die Menge an Sulfaten, die gefunden wurden, sind in Abb.25 zusammengefaßt und zeigen deutlich, daß ein Zusammenhang zwischen der Verwitterung der Kalke und der Anwesenheit von Thiobacillus besteht. Obwohl sich kein geschlossener Zyklus entwickelt, haben die oxydierenden Keime einen erheblichen Einfluß auf die Verwitterung. Ein weiterer Beweis ist die Abwesenheit von niedrigeren Oxydationsstufen des Schwefels, die nach den Industrieabgasen zu erwarten waren; dies wurde bereits von KIESLINGER (1932), KAISER (1929) und KESSLER (1960) konstatiert. Bei einem direkten Einfluß der Rauchgase müßten auch viel häufiger flachenhafte Verwitterungserscheinungen auftreten. Der Schwefel, der zur Anreicherung von sovielen Keimen und so hohen Sulfatmengen nötig ist, kommt im Stadtgebiet vor allem aus den Verbrennungsrückständen der Kohle und besonders des Heizöls. Der Hausbrand spielt dabei eine nicht zu unterschätzende Rolle. Weitere Schwefelquellen wären aus dem Boden infiltrierte pflanzliche Abbauprodukte und der Pyritgehalt der Gesteine selber. DREXLER (1931) berichtet z.B. über die Verwitterung von Dachschiefern, bei denen die stärksten Zerstörungen an der Stelle von Pyritanreicherungen lokalisiert waren, die dabei in Sulfate überführt wurden.

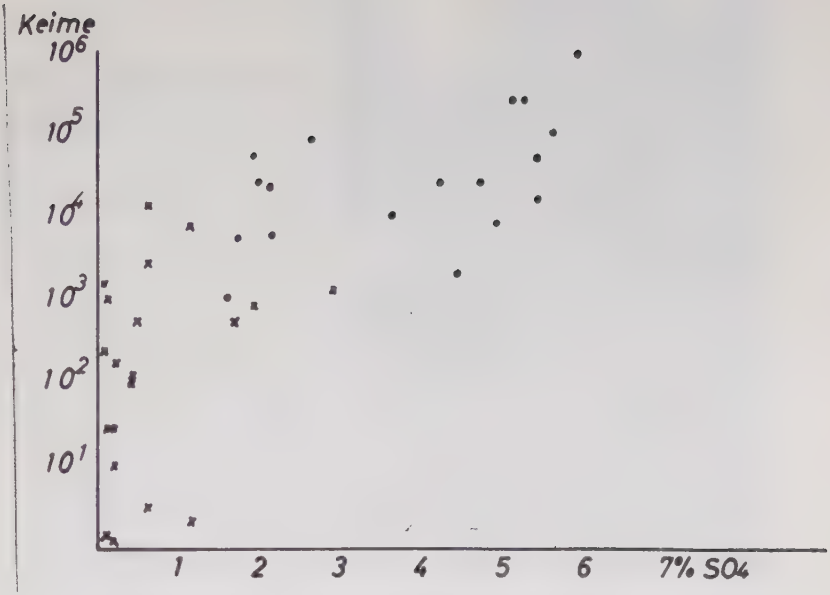

Abb.25: Schwefeloxydanten und Sulfat in den untersuchten Kalkproben. + = relativ unverwitterte Proben
•= verwittertes Material.

Die Ergebnisse der bakteriologischen und der chemischen Analyse decken sich auch bei der Schwefeloxydation sehr gut, mit Ausnahme einiger Proben, bei denen den hohen Zahlen für Thiobacillus keine hohen Sulfatwerte gegenüberstenen.
Die Alkalinität der untersuchten Kalke steht generell nicht im Widerspruch zu der gebildeten Schwefelsäure, da diese punktförmig ein"Mikromilieu" bildet und schnell wieder neutralisiert wird.

3. Flechten:

Flechtenbewuchs wurde nicht eingenender untersucht. Sie wurden aber - wenn vorhanden - an allen Probenahmepunkten registriert. Sie siedeln sich im Gegensatz zur übrigen Mikroflora vor allem auf der Sonne ausgesetzten Partien an, am häufigsten auf horizontalen Flachen. Köpfe und Schultern von Putten, Oberflächen von Steinbänken und Treppengeländer aus Stein sind bevorzugte Standorte. Das Gleichgewicht, das sich für die Entwicklung einer Flechte zwischen Pilz und Alge einstellen muß, scheint in unserem Klima vor allem starke Sonneneinstrahlung zu erfordern, weil sonst die Algen übernand nehmen würden. Die nötige Feuchtigkeit wird fast ausschließlich durch Kondenswasser gewonnen, das sich in der Nacht an den tags stark bestrahlten Flachen durch Warmerückstranlung bevorzugt bildet.

Endolithische und ausgesprochen zerstörend wirkende Flechten wurden nirgends registriert. An manchen Stellen kam es zur Entwicklung eines 1/4 - 1 mm mächtigen "Bodens" unter den Flechten. Das Gestein darunter ist aber völlig frisch. Interessanterweise scheinen - wie an einer Puttenreplik im Garten von Veitshöchheim zu senen ist- Algen und Flechten die Erstbesiedler der Plastiken zu sein, während die Stellen, an denen später die Hauptverwitterung einsetzt, zunächst noch unversehrt scheinen. In Abb. 27 sind die oberen Partien bereits stark bewachsen, während die Verwitterung durch Salze, Bakterien und Pilze erst später und in den Falten sowie unter Vorsprüngen einsetzen wird (vergl.Abb.26). Flechten wurden bedeutend haufiger und größer entwickelt außerhalb der Stadt als im Großstadtklima beobachtet.

Abb.26:
Flechtenbewuchs auf horizontalen Flächen (Veitshöchheim).

Abb.27:
Replik einer Putte aus Veitshöchheim; Algen und Flechten als Erstbesiedler.

4. Algen:

Bei allen untersuchten Proben wurde mit einem für Algen geeigneten Nährboden versucht, die Algenzahl auf den verwitternden Partien festzustellen. Wie schon aus der Beschreibung der Proben hervorgeht, waren die Orte intensiver Verwitterung und hoher Bakterienzahlen im Gestein nicht die gleichen, wie die des hauptsächlichen Algen- und Flechtenbefalls. So wundert es nicht, daß nur in seltenen Fällen Algen nachweisbar waren. Dies trifft nicht für die fast überall anwesenden Diatomeen zu, die sich in Flußsaureaufschlüssen in kleinen Mengen fast immer fanden.

Wenn in den untersuchten Proben Algen auftraten, so lag dies fast immer an vom Boden heraufreichendem Spritzwasser.

Das Algen, insbesondere Cyanophyceen, mitunter Lösungserscheinungen an Gesteinen bewirken, wies schon JAAG (1945) und BACHMANN (1915,1917) nach. Für JAAG ist der Beweis erst dann erbracht, wenn auf ihrer Unterlage Korrosionserscheinungen deutlich zu sehen sind (1945 p.417).

Schützende Beläge von Algen, die das Edaphon des Gesteines im günstigen Sinne beeinflussen, wurden auf Friedhöfen und gelegentlich an schattigen Mauern beobachtet. DELVERT (1962) wies Ähnliches für die Tempel von Angkor in Kambodscha nach.

Daß Algen die absolut ersten Besiedler eines Gesteines sind, trifft auch nur für bestimmte, mikroklimatisch definierte Regionen des Gesteines zu, da andere Bereiche, wie die Untersuchungsergebnisse belegen, zunächst von autotrophen und heterotrophen Bakterien besiedelt werden.

2. Pilze und Aktinomyceten:

Das Untersuchungsmaterial ergab in fast allen Fällen relativ hohe Zahlen für Pilze und Aktinomyceten. Die Zahl der Pilze war stark abhängig von den ermittelten pH-Werten. Sie lag auf Kalken allgemein niedriger als auf Sandsteinen. Bei den Proben 61,62 und 63 überstieg sie die Bakterienzahlen. Es ist möglich, daß in diesen Proben, deren Gesamtkeim- und Ammonifizierungszahlen extrem niedrig lagen, die von den Pilzen ausgeschiedenen Stoffwechselprodukte einen antibiotischen Effekt auf die Bakterien ausüben. Die wässrigen Extrakte dieser Proben und der sich ähnlich verhaltenden benachbarten Proben 64,65 u. 66 waren stark braun verfärbt und enthielten Eisen in wässriger Lösung, was auf das Vorhandensein einer größeren Huminfraktion schließen läßt. Nicht an organische Komplexe gebundenes Eisen (mit Ausnahme von Sulfaten und Nitraten, die wegen der Löslichkeitsprodukte eher an Alkalien und Erdalkalien gebunden sind) wurde im wässrigen Extrakt aufoxydiert und gefällt. Eine größere Zahl von Pilzen wurde isoliert und für spätere Untersuchungen gesammelt. Überwiegend wurden Penicillien und Trichodermaarten gefunden. Mucor, Fusarium und Verticillium kamen ebenfalls vor. Es wurden aber keine genaueren Artbestimmungen durchgeführt.Penicillien dominierten in den meisten Proben und wurden fast überall in der letzten noch Wachstum ergebenden Verdünnung gefunden.

Bei der relativ hohen Pilzzahl, die in vielen Proben gefunden wurde, lag es nahe ,an einen Einfluß der Bodenpilze auf die Verwitterung zu denken. Die Zerstörung von Mineralen durch Pilze wird nach den bisher erschienenen Arbeiten vor allem

durch deren Stoffwechselprodukte bewirkt.

HENDERSON u.DUFF (1963) weisen nach, daß durch Pilze gebildete Zitronen- und Oxalsäure Lösungen an Mineralen verursachen.

MÜLLER u.FÖRSTER (1963) zeigen, daß eine Reihe von Bodenpilzen, darunter vor allem Penicillium- und Mucorarten, Kalium aus Feldspaten freisetzen. Diese Untersuchungen wurden nach der "Aspergillusmethode" durchgeführt. Der Kaliumstieg im Pilzmycel, das auf Feldspat- impragnierten Nährboden gewachsen war wurde bestimmt. Die Lösung des Kaliums geschieht nach MÜLLER u.FÖRSTER "durch stoffwechselbürtige Wasserstoffionen" (1963,p.406). Selbst, wenn man das Medium nicht ansäuert, um reproduzierbare Werte zu erhalten, werden genügend Protonen geliefert, um das für den Stoffwechsel nötige Kalium aus den Feldspaten freizusetzen.

ENO (1955) zeigt, daß Aspergillus niger, eines der gebräuchlichsten Testobjekte, Nährstoffe selbst aus so stabilen Mineralen wie Biotit freisetzt. Sowohl bei den Feldspäten als beim Biotit bleibt das Silikatgerüst zunächst erhalten.

Dies gibt einen Hinweis für den möglichen Abtransport von Ionen aus Feldspäten und Tonmineralen, der für die Umwandlung von Feldspaten und die Weiterverwandlung von Tonmineralen nötig ist. Eine der Theorien zur Bildung von Tonmineralen verlangt, daß bei gleichzeitiger Abfuhr von Ionen die Al- und Si-Gerüsttetraeder erhalten bleiben müssen.

Über die einzelnen Theorien vergl. DEGENS(1965). BAAS-BECKING et al.(1960) nehmen als einen Weg der Umbildung von Feldspaten in Richtung auf Tonminerale den Abtransport von Alkalien u. Erdalkalien (Eisen) durch Eintausch von Protonen an, die nach MÜLLER (1963) stoffwechselbürtig sein können.

Da auch in den Muschelkalkproben Pilze in größeren Mengen vorkamen, wurde in einer einfachen Versuchsanordnung ein Pilznährboden mit Muschelkalkpulver versetzt und mit 10 der isolierten Pilzstämme beimpft.

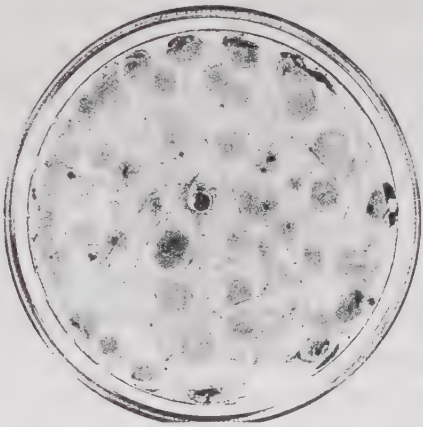

Abb.28: Lösungshöfe in Muschelkalk durch Pilzkolonien photografiert nach dem Abernten der Mycelien.

Von 10 untersuchten Stämmen haben 7 Lösungshöfe in dem kalkimprägnierten Nährboden verursacht. Aus den zitierten Arbeiten, der Menge an gefundenen Pilzen und dem Kulturversuch geht hervor, daß Bodenpilze, wenn sie in nennenswerten Zahlen vorliegen, durchaus imstande sind, Zerstörungen an Gesteinen zu verursachen und zu beschleunigen, indem sie Lösungsvorgänge entweder durch ausgeschiedene Säuren oder durch eingetauschte Nährstoffe verursachen.
Der quantitative Anteil läßt sich jedoch im Laborversuch nicht festlegen, da hier optimale Kulturbedingungen vorliegen.

6. Gesamtmikroflora und Verwitterungsversuch mit Muschelkalk- und Werksandsteinproben:

Die ermittelten Keimzahlen beweisen, daß auf den hiesigen Bausteinen und besonders dort, wo sie intensiv verwittern, eine reiche, differenzierte Mikroflora vorhanden ist, die einen Einfluß auf die Verwitterung der Gesteine hat. Es ließ sich feststellen, daß die Besiedlung weiter in das Gestein eindringt, als die mit dem bloßen Auge sichtbaren Verwitterungserscheinungen. Sie kann also teilweise als Wegbereiter einer intensiven Verwitterung angesehen werden.

Die ermittelten Gesamtkeimzahlen staffeln sich in ihrer Größenordnung:

a) Nach dem Verwitterungsgrad des untersuchten Gesteines (Probe 1 verwittert: 180 000 000 Keime/g; Probe 2 unverwittert: 500 000 Keime/g).

   Eine Ausnahme von dieser Regel bieten verschiedene Sandsteinproben, bei denen festzustellen war, daß völlig zu Sand zerfallene Partien wieder niedrigere Keimzahlen haben, als angewitterte und im Zerfall begriffene Proben (z.B. Proben 46 u. 47). Die biologische Aktivität verläuft also in einer Kurve und zeigt Maxima. Dies spricht für die Annahme, daß der menschliche Eingriff, oder Veränderungen anderer Art eine Reaktion hervorrufen, die dann wieder zu einem Gleichgewichtszustand auf der neuen Basis führen kann.

b) Nach dem Standort der untersuchten Gesteine in der Stadt, in kleinen Gemeinden außerhalb eines Großsiedlungsbereiches oder im Steinbruch. Die Gesamtflora besitzt in der Stadt

die höchsten Werte und im Steinbruch die niedrigsten.

c) Nach ihrem mikroklimatischen und edaphischen Standort. Vergleiche der Keimzahlen rund um die Adalbertkirche machen diese Abhängigkeit am deutlichsten (30-34). Das Maximum liegt in windgeschützten Ecken, wo überhängende Gebäudeteile einen zusätzlichen Verdunstungsschutz geben. Das Minimum stellen Proben, die von Mauern stammen, die von Wind, Sonne und Schlagregen ungehindert getroffen werden, wodurch sowohl die Feuchtigkeit nicht andauernd ist, als auch das Nährstoffangebot nicht noch genug ansteigt. Bei dem edaphischen Standpunkt spielt auch die Reaktionsfähigkeit des Gesteines eine Rolle, das, obschon aus natürlichen Baustoffen bestehend, als Baustein "verfremdet" wurde und der neuen Umgebung angepaßt werden muß. Diese "Anpassung" kann natürlich bis zu völligem Verfall führen. Dies steht in engem Zusammenhang mit dem letzten Faktor.

d) Abhängig waren die Keimzahlen ebenfalls von der Art des untersuchten Gesteines. Dieser Unterschied hängt stark vom pH-Wert des betreffenden Gesteines ab, aber auch von Größen wie mineralische Zusammensetzung, Art des Bindemittels und Permeabilität.

Sehr charakteristisch für den Unterschied der Besiedlung von Gesteinen innerhalb des Großstadtbereiches und außerhalb der Stadt war die Untersuchung der Proben 57, 76 u. 77. Obwohl die Gesteine aus dem Steinbruch bedeutend länger der Atmosphäre ausgesetzt waren, als die völlig frisch erscheinende Probe 57, lag die Keimzahl der Stadtprobe bedeutend höher. Die Proben 58, 59 u. 60 beweisen, daß sich in der Stadt bei geeigneter Exposition bereits nach kurzer Zeit

eine kräftige Flora ansiedelt und entwickelt, während in den Steinbruchen nach einer sicherlich vorhandenen kurzen Anpassungszeit die Entwicklung der Flora stagniert. Einschränkend muß gesagt werden, daß im Falle der untersuchten Steinbrüche keine stärkeren Verwitterungsvorgänge vorlagen, während in anderen Steinbrüchen mitunter heftige Verwitterung einsetzt, wenn sie nicht mehr abgebaut werden.

Die Ursachen für die höheren Werte der Mikroflora in der Stadt sind in der Besonderheit des Stadtklimas zu suchen. Der Gehalt der Luft an Staub und organischen, leicht abbaubaren Verbindungen liegt höher, und die Staub- und Aschepartikel bilden Kondensationskeime für das organische Material, das dann zusammen mit dem Staub auf den Gebäuden sedimentiert wird. Temperatur und Feuchtigkeit sind im Stadtgebiet ausgeglichener, die Temperatur liegt im Durchschnitt höher als auf dem flachen Lande. Weitere Einflüsse bietet die Hauptwindrichtung im Stadtgebiet und die entsprechenden Windrosen (vergl. KIESLINGER, 1932). Ebenfalls modifizierend wirken die in Würzburg häufigen"Inversionslagen" mit Talnebel.(Gutachten der Wetterwarte für die Stadtwerke zur Höhe der Schornsteine des Heizkraftwerkes).

THIEBAUD u. LAJUDIE (1963) ,die je eine Probe aus Paris und dem Vorort St.Cloud untersuchten, kamen zu dem Schluß, daß die Mikroflora keine bedeutenden Unterschiede zeigte. St. Cloud liegt aber im Südosten von Paris und bei der Zeichnung einer Windrose und des Staubanfalles würde es zum engeren Stadtgebiet gehören, da die Windrose und Staubverteilungskarte in dieser Region ebenso wie hier eine Ausbuchtung nach SE zeigen.

Daß ausgeglichenere und annähernd konstante Feuchtigkeits-und Temperaturbedingungen einen fördernden Einfluß auf die Mikroflora haben, beweisen auch die Untersuchungen in der Grotte von Lascaux (POCHON et al. 1964; LEFEVRE et al.,1964), w gerade die ausgeglichenen Verhältnisse trotz Temperaturen weit unter dem Optimum ei:: senr schnelle Vermehrung der Mikroflora zur Folge hatten. Die Mikroflora bezog ihren Nahrstoffbedarf nahezu völlig aus dem eigenen Kreislauf (Algen, Bakterien, Pilze) und den organischen Verbindungen, die die Besucher einschleppten.

Unterschiede in der Menge an organischem Material, die auf Bausteinen angereichert wird, sind im Einzelfalle nicht immer nachweisbar. Wichtig ist, daß einmal sedimentiertes Material nicht wieder fortgewent- oder gewaschen wird. Windrichtung, Nähe von Ansammlungen organischen Materials wie Abfallhaufen, Bäckereien etc., sowie Menschenansammlungen können zu Modifikationen des Nahrstoffangebotes auf Gesteinen auch innernalb der Gesamtatmosphäre einer Großstadt führen.

Wichtiger als die Nahrstoffversorgung ist das Mikroklima und die speziellen Standortbedingungen der Flora.

Abb.29 sollte die Standortbedingungen an einem freistehenden Gebäude demonstrieren.

Es wurden mehrere Zonen ausgegliedert, die durch Besiedlung und Verwitterungstyp charakterisiert sind.

Zone I: Im Bereich der Putten wechseln mehrere floristische Besiedlungstypen auf engem Raum. Die der Sonne exponierten horizontalen und geneigten Flachen wie Kopf, Schultern und Oberschenkel, die nicht tiefer vom Regen befeuchtet werden, sind vor allem mit Flechten bewachsen. Diese Flachen

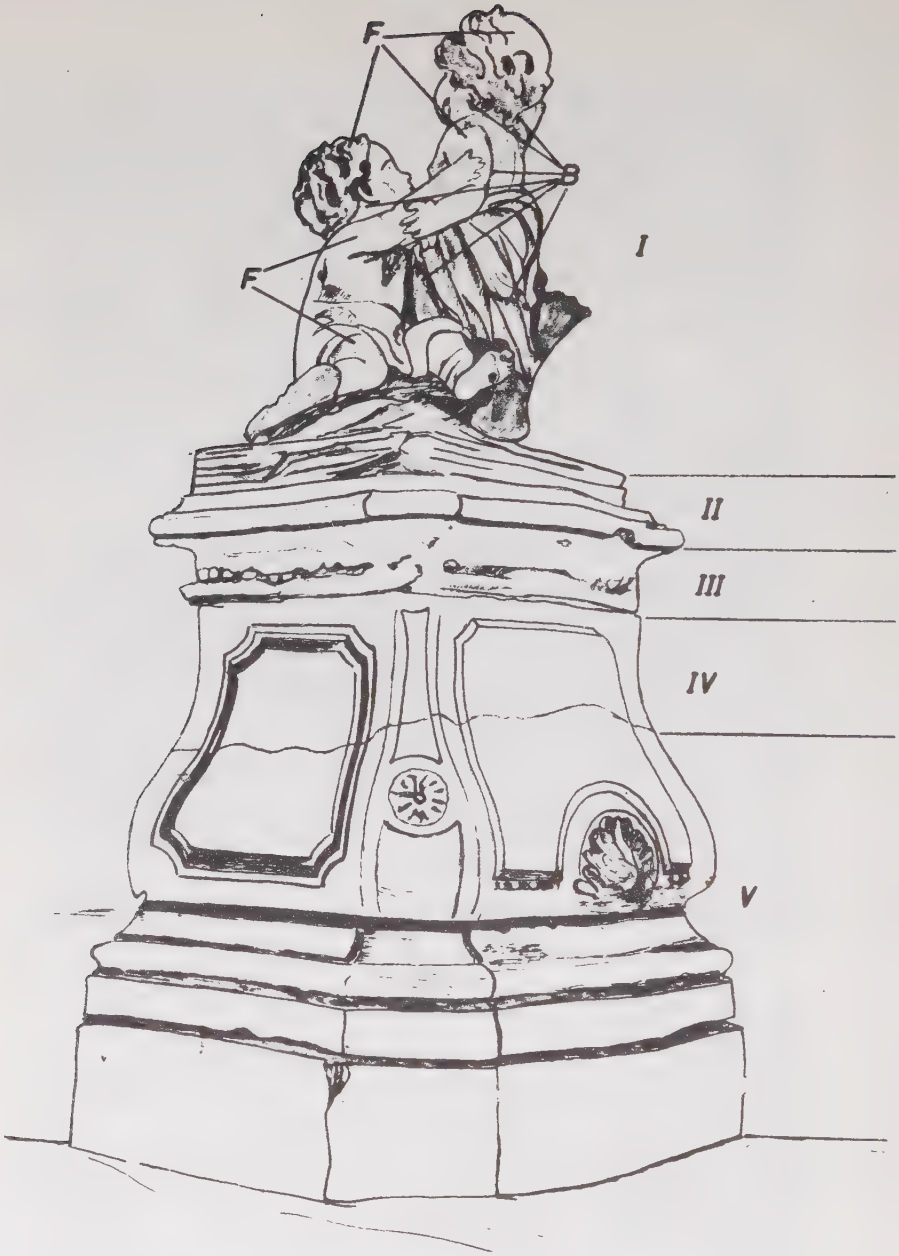

Abb.29: Besiedlungsregionen auf einer freistehenden Plastik im Hofgarten (Erläuterung im Text).

verwittern sehr langsam, sonst könnten sich die Flechten nicht halten. Die Flechten halten genügend Kondenswasser fest, um ihren Feuchtigkeitsbedarf zu decken.
Große Mengen an Bakterien und Pilzen treten vor allem an Stellen auf, die durch übernängende Teile schattig sind und vor zu schneller Verdunstung des Wassers geschützt. An diesen Stellen bleibt auch Anflugmaterial länger haften. Dazu gehören Achselhöhlen, Hals, Partien unter der Frisur und in Kleidungsfalten. Die Mikroflora dringt hier relativ tief in das Gestein ein, da sich keine Schutzkruste bildet und führt zur Ansammlung von löslichen Salzen, die den eingeleiteten Verwitterungsprozeß durch Hydratisierung beschleunigen.
Zone II: In dieser Zone ist äußerst selten Verwitterung zu konstatieren. Auf den horizontalen Partien siedeln sich gelegentlich Flechten an (Abb.42) unter denen das Gestein unversehrt bleibt. Bakterien sind in geringerer Zahl vorhanden als in Zone I (vergl. Proben 70-72).
Zone III: Unter überhängenden Simsen entwickelt sich aus den öfters erwähnten Gründen des Feuchtigkeits- und Nährstoffhaushaltes (Proben 30- 34) eine bedeutende Bakterien - und Pilzflora, die bis zu 5 cm tief in das Gestein eindringt und die obenerwähnten Verwitterungsvorgange begünstigt und einleitet. Die Salzverwitterung ist eine natürliche Folge der Ansammlung von autotropnen und neterotropnen Mikroorganismen und kann an diesen Punkten auch unabhangig davon Fortschritte machen.
Zone IV: Sanft geneigte Flächen ohne starkeres Relief sind im allgemeinen nicht so anfällig gegen Besiedlung und Verwitterung. Salze, die sich eventuell bilden,werden vom Ab-

laufwasser schnell entfernt.

Zone V: Vom eingezeichneten Kapillarsaum an, der durch vom Boden aufsteigende und im Gestein heruntersickernde Feuchtigkeit entstehen kann, ist das Gestein vielfach mit Algen besiedelt. Es kommt durch den andersartigen Feuchtigkeits- und Temperaturhaushalt nicht zur Entwicklung von Flechten. Stellenweise treten Moose auf. Die Mikroflora, die dem Algenteppich vergesellschaftet ist, dringt an diesen Partien nicht tiefer in das Gestein ein (vergl. JAAG, 1945, p. 437 ff).

In einigen Fällen wird der Algenteppich in dieser Region so dicht, daß er als natürliche Schutzkruste wirkt, die den Extremen der Witterungsbedingungen entgegenwirkt.

Insgesamt kann gesagt werden, daß die Mikroflora mit Ausnahme der Flechten und Algen immer dort zu finden ist und am zahlreichsten wird, wo auch die stärksten Verwitterungserscheinungen festzustellen sind. Dies erklärt sich einmal durch die Lebensbedingungen der Mikroorganismen, sowie durch die mikrobiologisch bedingte Anreicherung von Nitraten und Sulfaten, die dann die Salzverwitterung beschleunigen.

Die biologisch entstandenen Radikale addieren sich an geeigneten Stellen zu den im Gestein zirkulierenden agressiven Lösungen.

Um einen Eindruck von der Veränderung der Löslichkeit einiger Elemente aus Sandsteinen und Kalken durch biologische Vorgänge zu erhalten wurde ein weiterer Verwitterungsversuch durchgeführt. Als Impfgut wurde Gesteinsmaterial verwendet, das nachgewiesenermaßen eine reiche Flora enthielt.

8 1-l Kulturgefäße wurden mit je 10 g feingestoßenem Gesteinspulver und 300 ml Wasser gefüllt. 2 Gefäße wurden zur Kontrolle

sterilisiert. Weitere Gefäße wurden mit 10 g Pepton oder mit Schwefel angereichert. Je ein Gefäß wurde unsterilisiert ohne Nährbodenzusatz bebrütet. So konnte der Gehalt an wasserlöslichen Ionen unter normalen Bedingungen, im sterilen Zustand und bei Nährstoffgaben kontrolliert werden. Alle Kolben wurden 3 Monate bei 28°C bebrütet. Dann wurde 2 Stunden gekocht, filtriert und im Filtrat auf die in Tabelle III angegebenen Ionen geprüft.

TABELLE III

a) 10g Werksandsteinpulver/ 300 ml Wasser kamen zum Ansatz

	steril	unsteril	+ 10g Pepton
Na	0,108	0,125	0,140
K	0,022	0,120	0,148
Ca	0,36	0,45	1,03
Mg	0,21	0,26	0,39
SO4	0,2	0,3	0,7
NO3	0,08	0,10	2,69

b) 10g Kalkpulver/ 300 ml Wasser kamen zum Ansatz

	steril	unsteril	+10 g Pepton	+ 1g S steril	+ 1g S unsteril
Na	0,012	0,012	0,020	0,010	0,035
K	0,005	0,008	0,110	0,02	0,045
Ca	0,48	1,03	2,38	0,45	2,82
Mg	0,00	0,00	0,01	0,00	0,13
SO4	0,6	0,9	1,2	0,7	3,1
NO3	0,10	0,21	3,22	0,16	0,23

Die Analysenergebnisse aus Tabelle III zeigen, daß das wasserlösliche Material bei den Proben, die nicht sterilisiert wurden und besonders bei denen , wo ein Nährmedium oder eine Energiequelle zugefügt wurde, signifikant zunahm. In den sterilisierten Proben blieb der pH-Wert nahezu unverändert, während er in der mit Schwefel angereicherten Probe stark absank .

Der Anstieg der Sulfate in der unsterilisierten Probe kann auf in der Probe vorhandenes organisches Material und Sulfide zurückgeführt werden, die Zunahme der Nitrate in der mit Pepton angereicherten Probe auf die Aminosäuren. Der gleichzeitige Anstieg von Sulfat liegt wahrscheinlich an den S-haltigen Aminosäuren, obwohl Thiobacillen nicht an der Oxydation beteiligt sein dürften (Hemmung durch größere Mengen von organischem Material). Da in den nichtsterilisierten Proben die Alkalien und Erdalkalien stärker in Lösung gingen als in den sterilisierten, kann auf eine Weiterentwicklung der ursprünglichen Mikroflora unter günstigeren Bedingungen auch ohne Nährstoffgaben geschlossen werden.

Ein anderer Verwitterungsversuch auf festen Silikagelnährböden für die autotrophen Mikroorganismen verlief ohne größeren Erfolg. Die Platten, die mit Mineralsalzen imprägniert waren, wurden mit angeschliffenen Kalklamellen belegt, mit Schwefel bzw. Ammoniak als Energiequelle versehen und mit keimreichen Gesteinsfragmenten beimpft. KAUFFMANN (1954) hatte erhebliche Lösungshöfe durch N-oxydierende Keime erzielt. Nach einigen Wochen waren lediglich die mit Schwefel angereicherten Kalkplättchen an den mit Gesteinsfragmenten beimpften Stellen schwach korrodiert.

B.) pH-WERT UND REDOXPOTENTIAL

Die Messungen der pH-Werte vor und nach der wässrigen Extraktion ergab, wie zu erwarten war, bedeutend höhere Werte für die Kalke, als für die Sandsteine.

TABELLE IV

Mittelwerte für	vor	nach Extraktion
Muschelkalk relativ unverwittert	9,00	8,14
Muschelkalk verwittert	9,00	8,31
Werksandstein relativ unverwittert	6,98	6,12
Werksandstein verwittert	7,13	6,56
Buntsandstein relativ unverwittert	7,00	5,70
Buntsandstein verwittert	6,70	5,66

Die Mittelwerte aus den Einzelmessungen ergeben die Tendenz, daß nach Lösen der vorhandenen Alkali- und Erdalkalisalze der pH-Wert von unverwittert zu verwittert bei den Kalken und Werksandsteinen ansteigt, während er im Durchschnitt bei den Buntsandsteinproben fällt. Diese Tendenz ist nicht unbedingt ein Anzeichen für reduzierende Bedingungen. Bei den Kalken kann sie eine Folge der hohen Zahlen an heterotrophen Keimen sein. Da die nicht extrahierten Proben mitunter ein Abnehmen der pH-Werte von unverwittert zu verwittert zeigen, ist es möglich, daß organische Komplexe, die eventuell an die Tonminerale gebunden sind (DURAND, 1965) beim Kochen extrahiert und zerstört werden und den pH-wert nicht mehr beeinflussen können. Die an die Tonfraktion gebundenen Humine und Enzyme können das Redoxpotential und den pH-Wert eines Bodens ent-

scheidend beeinflussen (CARROL, 1958 u. 1959).
Da sich an den untersuchten Proben leider keine Eh-Messungen durchführen ließen, kann über das Redoxpotential und die biologischen Verschiebungen dieser Größe keine weitere Aussage gemacht werden. Über Redoxvorgänge und die Modifizierung des Elektropotentials in Sedimenten berichten KRUMBEIN u. GARRELS (1952) und HALVORSON u. STARKEY (1931) sowie in einer sehr eingehenden Arbeit BAAS -BECKING,KAPLAN u. MOORE (1960).
In allen erwähnten Arbeiten kommt immer wieder zum Ausdruck, daß verschiedenen Mikroorganismen die Fähigkeit zugesprochen wird, ein Milieu entscheidend zu beeinflussen und daß in der Natur mehrere "Mikromilieus" nebeneinander auf kleinstem Raum existieren können, die mit den gängigen Methoden nicht genau differenzierbar sind.
So war es z.B. möglich, daß in ein und derselben Probe große Mengen an oxydierenden Keimen vorkommen, während Eisen selbst in der Verdünnung 10^{-6} mit Dipyridyl als Indikator noch schnell reduziert wird. In 7 Proben,deren Wert an 2-wertigem Eisen höher lag als im Durchschnitt,wurde dieser Test durchgeführt (Vergl. Nährboden 16). Dabei wurde bei 4 Proben Eisen bis zur Verdünnung 10^{-6} und in den restlichen 3 Proben bis zur Verdünnung 10^{-4} reduziert. Es waren also mindestens 10^{4} Keime/g die fähig sind,ein Milieu zu erzeugen, das reduzierend wirkt. Gleichzeitig finden aber erhebliche Lösungen und Umsetzungen durch oxydierende autotrophe Keime statt. Diese Gleichzeitigkeit wird allerdings durch die geringe Transportfähigkeit des im Gesteinvorhandenen Wassers erleichtert, sowie durch die Abgeschlossenheit der einzelnen "Mikromilieus" voneinander im Vergleich zu den Vorgängen in einer Lösung.

C.) CHEMISMUS DER UNTERSUCHTEN PROBEN

Von den mikrobiologisch untersuchten Proben wurden mit wenigen Ausnahmen chemische Analysen in 2 Fraktionen gemacht. Der Wasserextrakt erfaßt die Elemente, die in lösliche Salze überführt wurden. Der Salzsäureextrakt der Kalke entspricht einem Kalkvollaufschluß mit Ausnahme der Tonminerale und geringfügigen Beimengungen anderer HCl-unlöslicher Verbindungen. Bei den untersuchten Sandsteinen stellen Wasserextrakt und HCl-extrakt 2 Fraktionen nach dem Aufschließungsgrad dar, da in Salzsäure keines der Hauptminerale eines Sandsteines (Quarz, Feldspäte, Tonminerale) löslich sein sollte. Ein Teil der Ionen entstammt nicht den Untersuchungsgesteinen selbst, sondern wurde im Laufe der Verwitterung aufgenommen. (z.B. NO_3 u. SO_4)

1.) Kalke:

In den wässrigen Auszügen der Kalke wurden Ca und Mg als Sulfate angereichert, wobei die Umsetzung von Karbonat zu Sulfat vor allem durch die Tätigkeit der Thiobacillen bewirkt wird. Es kommt ebenso zu einer untergeordneten Anreicherung von Na- und K- salzen. Eisen nimmt in den Salzsäureauszügen der Kalke von unverwittert nach verwittert zu. Die Eisen-, Natrium-und Kaliumwerte nehmen ebenfalls mit steigendem Anteil an Tonmineralen zu. Eisen liegt fast immer in oxydischer Form vor. In einigen Ausnahmefallen kamen auch wasserlösliche Eisensalze vor.

Auf Grund der Verarmung an Kalziumkarbonat in den verwitterten Kalken kommt es zu einer Anreicherung des unloslichen Rückstandes. Die Gehalte an wasserloslichen Ionen nehmen generell

mit steigendem Verwitterungsgrad zu. Die Proben aus dem Stadtgebiet enthielten im allgemeinen die meisten loslichen Salze. Dies ist auf die Tatigkeit der Mikroorganismen und den höheren Genalt der Stadtluft an agressiven Radikalen zurückzufuhren.

2.) Sandsteine:

Der Unterschied im Verwitterungsgrad zwischen Bauwerken im Stadtgebiet und außerhalb von Großsiedlungen ist bei den Sandsteinen fast noch ausgeprägter als bei den Kalken. Na und K sind in der Stadt vor allem in den wässrigen Auszügen angereichert, während sie außerhalb mehr in den Salzsäureextrakten vorliegen.

Insgesamt sind die Na-werte beim Werksandstein höher als beim Buntsandstein. Dies erklärt sich durch den höheren Genalt an leichter verwitternden Plagioklasen.

Ca nimmt in den Wasserextrakten von unverwittert nach verwittert zu. Auch hier war eine Differenzierung der Proben aus dem Stadtgebiet und vom Land zu erkennen. Während bei den Kalken vor allem Sulfat neugebildet wurde, nimmt bei den Sandsteinen mit steigender Verwitterung Nitrat zu. In den bakteriologischen Untersuchungen waren auf den Sandsteinen auch die stickstoffoxydierenden Keime dominierend.

Sulfit wurde weder in Sandsteinen noch in Kalken gefunden. Freie Schwefelsaure müßte sich aber nachweisen lassen, wenn sie tatsächlich im Gestein zirkulieren würde. Sie kann also nicht der Luft oder pflanzlichen Abbauprodukten (RIPPEL u. BLANCK, 1931)entstammen. SCHMÖLZER (1936) schloß daraus, daß Zufuhr von Alkali- und Erdalkalisulfatlosungen die Ursache der steigenden Sulfatmengen sein müsse, Mit den

TABELLE V

Übersicht über den Chemismus der untersuchten Proben anhand der Mittelwerte. in %

		Na	K	Ca	Mg	FeII	FeIII	NO3	SO4
Kalkproben aus Würzburg	unverwittert H_2O-auszug	0,053	0,036	0,35	0,02	---	---	0,11	0,8
	verwittert H_2O-auszug	0,095	0,057	1,45	0,03	---	---	0,26	2,7
	unverwittert HCl-auszug	0,020	0,022	36,25	0,27	0,44	0,21	---	---
	verwittert HCl-auszug	0,026	0,061	32,20	0,72	0,49	0,43	---	---
Kalkproben außerhalb von Großsiedlungen	unverwittert H_2O-auszug	0,013	0,033	0,14	0,00	---	---	0,11	0,2
	verwittert H_2O-auszug	0,052	0,083	1,29	0,00	---	---	0,14	1,2
	unverwittert HCl-auszug	0,020	0,100	31,15	0,27	0,41	0,25	---	---
	verwittert HCl-auszug	0,021	0,122	26,97	0,29	0,46	0,44	---	---
Werksandstein-proben aus Würzburg	unverwittert H_2O-auszug	0,154	0,093	0,79	0,03	---	---	0,50	0,7
	verwittert H_2O-auszug	0,348	0,113	1,77	0,05	---	---	0,79	1,2
	unverwittert HCl-auszug	0,019	0,073	0,80	0,08	1,05	0,89	---	---
	verwittert HCl-auszug	0,025	0,065	1,05	0,98	0,84	0,79	---	---
Werksandstein-proben außerhalb von Großsiedlungen	unverwittert H_2O-auszug	0,010	0,017	0,09	0,00	---	---	0,41	0,6
	verwittert H_2O-auszug	0,007	0,024	0,75	0,09	---	---	0,71	1,1
	unverwittert HCl-auszug	0,014	0,089	0,63	1,01	0,96	0,83	---	---
	verwittert HCl-auszug	0,013	0,075	0,63	1,19	0,90	0,65	---	---
Buntsandstein-proben aus Würzburg und Umgebung	unverwittert H_2O-auszug	0,019	0,039	0,29	0,02	---	---	0,34	0,3
	verwittert H_2O-auszug	0,132	0,096	0,71	0,04	---	---	0,62	0,6
	unverwittert HCl-auszug	0,005	0,126	0,09	0,48	0,63	0,54	---	---
	verwittert HCl-auszug	0,008	0,168	0,18	0,83	0,73	0,86	---	---

reichlich vorhandenen Thiobacillen bietet sich ein einfacher und wahrscheinlicher Weg an, die Herkunft der Sulfate zu erklären, sowie die Umsetzung der Karbonate, ohne daß freie Säure weitere Wege im Gestein zurücklegen müßte.
Die biologisch produzierte Schwefelsäure wird sofort mit den Mineralen umgesetzt und es kommt zu kleinsten Gipsaggregaten. Der Gips liegt, obschon er bedeutende Mengen erreichen kann, meistens auch so feinverteilt vor, daß er im Dünnschliff nicht identifiziert werden kann.
Auch in den Sandsteinen kamen beträchtliche Mengen von FeII vor. Das Verhältnis von 2- zu 3-wertigem Eisen war in vielen Fällen nahezu 1:1. Ein großer Teil des Eisens liegt wahrscheinlich als Oxydhydrat vor. SEGALEN (1964) betont, daß die Eisenoxydhydrate im Gestein meistens als Mischsalze des 2- und 3-wertigen Eisens existieren. Beim Extrahieren mit Wasser würde 2-wertiges Eisen aufoxydiert und fiele als Oxyd aus. Die Rotfarbung des Buntsandsteins spricht nicht gegen die Anwesenheit eines größeren Anteiles an 2-wertigem Eisen, da bereits geringe Beimengungen von 3-wertigem Eisen Rotfärbung hervorrufen. Die Intensität der Farbe hängt auch stark vom Verteilungsgrad des Eisens ab.
Ein weiterer Hinweis für die Anwesenheit von 2-wertigem Eisen gerade in den verwitterten Proben ist die in mehreren Proben nachgewiesene Eisen reduzierende Flora.

3.) Spurenelemente:

In 13 Proben wurden freundlicherweise durch Herrn Dr. A. PRASHNOWSKI halbquantitative Nachweise auf Ba, Sr, Mn, Cu, B,Ti,V,Cr, Mo und Pb durchgeführt. Die ermittelten Daten geben bis auf 2 Elemente keine Unter-

schiede zwischen unverwittertem und verwittertem Material. Spuren von Blei traten nur in verwitterten Proben auf. Ebenso fand sich nur in 2 verwitterten Proben Molybdän(65 u. 67). Es wäre aussichtsreicher, nicht in den Gesteinen selber sondern in Zellfraktionen von auf Gesteinssuspensionen kultivierten Bakterien auf Spurenelemente zu prüfen,um einen Überblick über den Einfluß der Mikroflora auf eventuelle Anreicherung dieser Elemente zu bekommen.
Da mit wenigen Ausnahmen die stärker verwitterten Gesteine eine reiche Mikroflora enthielten; und bei einigen Keimarten mit Sicherheit ein Einfluß auf die Mineralzusammensetzung besteht, kann ein Einfluß auf die Verwitterung durch Mikroorganismen als sicher angenommen werden. Wahrscheinlich ist der größte Teil der im Gestein entstehenden Sulfate und Nitrate zumindest auf dem Umweg über die Mikroflora entstanden.

4.)Kohlenstoffanalysen:

Um einen Eindruck von der Anreicherung an organischem Material auf Gesteinen zu bekommen und festzustellen, ob hierbei Windrichtung und Ausgesetztheit eine Rolle spielen,wurden von folgenden 6 Proben Bestimmungen des organischen Kohlenstoffs durchgeführt.

Probe 1 : 0,7 % Probe 57 : 0,15% Probe 61 : 0,27%
Probe 2 : 0,2 % Probe 54 : 0,27% Probe 62 : 0,41%

Aus diesen Werten geht hervor, daß die Exposition vielleicht eine Anreicherung von organischem Material an Stellen erbringt, die nahe an verkehrsreichen, besiedelten Gebieten liegen, denen der Wind viel organisches Material zutragen kann, ohne daß sie direkt Wind und Regen ausgesetzt wären, weil dann

antransportiertes Material wieder weggewaschen würde.

Die Menge an organischem Kohlenstoff nimmt von unverwittert nach verwittert zu und ist an Stellen, denen der Wind Material zuträgt, höher als an Orten, die nicht dem Einfluß der Stadtatmosphäre ausgesetzt sind, oder so liegen, daß die Hauptwindrichtung kein organisches Material herantransportieren kann.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß im Laufe der Untersuchungen ein deutlicher Zusammenhang zwischen Chemismus der Proben und der besiedelnden Mikroflora festgestellt werden konnte. Die zahlreichen früheren Untersuchungen (z.B. SCHMÖLZER, 1936, KIESLINGER, 1932), die einen Zusammenhang zwischen Chemismus und Grad der Verwitterung nachwiesen wurden in allen Punkten bestätigt.

Allerdings ist bei chemischen Veränderungen der Gesteine oft eine biologische Phase zwischengeschaltet.

VIII

SCHUTZMASSNAHMEN GEGEN DIE GESTEINSVERWITTERUNG

KESSLER (1960) diskutiert einen kleinen Katalog von möglichen Maßnahmen gegen die Gesteinsverwitterung an Bauwerken.
Daß Schutzanstriche, Zementmörtel und Behandlungen mit Flußsäure-Silikatbädern, die nicht tiefer als 2-4 cm in das Gestein eindringen, meistens eher schädliche als günstige Folgen haben, ist bekannt. Pflanzenbewuchs ist in nahezu allen Fällen schadlich, da er das Gestein mit organischen Substanzen versorgt, die die Entwicklung einer schädigenden Mikroflora begünstigen.
Wenn allerdings eine"Algen- oder Flechtenpatina" existiert, könnte diese durch Regulierung von Feuchtigkeit und Wärme einen günstigen Einfluß haben, besonders weil die übrige Mikroflora (bakterien u. Pilze) an diesen Stellen offenbar nicht so tief in das Gestein eindringt.
Eine Trankung mit Leinöl, wie sie schon vor Jahrhunderten gelegentlich durchgeführt wurde und fälschlicherweise aus den alten Bauakten als "Öl-farbenanstrich" gedeutet wurde, kann eventuell die Poren gegen das Eindringen von Wasser schützen, ohne daß die Luft am Zutritt gehindert wäre. Auch hier ist allerdings die Frage der Eindringtiefe der Trankung wichtig.
Bei Plastiken empfiehlt es sich- nach vorangegangener mikrobiologischer Untersuchung- Waschungen mit Antibiotika oder Formaldehydlösung durchzuführen, wobei losliche Salze mit entfernt würden.
Solche Maßnahmen können im Freien allerdings nur vorübergehend helfen, da eine Neubesiedlung nicht zu vermeiden ist.
Die Mikroflora, die die Malereien in Lascaux schadigte,konnte

auf diese Weise um 90% reduziert werden (LEFEVRE,POCHON et al.,1964).

Zu häufige Waschungen können aber ungünstige Auswirkungen auf das Konzentrationsgefälle der Salzlösungen in einem Gestein haben, denn nur ein Teil der Salze wird an Ort und Stelle durch die Mikroflora gebildet werden.

Da der Buntsandstein nicht so anfällig gegen Besiedlung sowie physikalisch- chemische Verwitterung scheint wie der Werksandstein, empfiehlt er sich eher zur Verwendung für im Freien aufgestellte Skulpturen.

Abb. 30: Putte aus dem Hofgarten mit Plastiküberzug.

Dringend abzuraten ist von Maßnahmen gegen die Kälte und Feuchtigkeit mittels Plastikfolie wie auf Abb.30,

1. Wird die "Atmung" des Gesteines beschränkt.
2. Wird Kälte nicht so wirksam abgehalten, wie durch belüftete Holzverschläge.
3. Entwickelt sich sofort mit Sonnenaufgang Kondenswasser in großer Menge, und es kommt zu einem Treibhauseffekt, der

sowohl die Mikroflora als die Umkristallisationen von Salzen begünstigt.

Eine Sanierung gegen aufsteigendes Wasser ist immer anzuraten, wo sie möglich ist. Kapillarsäume werden dadurch allerdings nicht absolut vermieden, da auch absteigendes und seitlich-infiltrierendes Wasser zu ähnlichen Erscheinungen führen kann.

Vor ungenügenden Überdachungen und ähnlichen Halbmaßnahmen muß gewarnt werden, da dann für die gesamte Region dasselbe Milieu sich entwickeln kann, das gerade unter übernängenden Gebäudeteilen zu schwersten Schaden führt.

Anhang

Im Anhang werden die Ergebnisse der biologischen und chemischen Untersuchungen der Einzelproben in Tabellen zusammengestellt. Die Zahlen im biologischen Teil entsprechen, wie eingangs erwähnt, Keimzahlen / g Trockenmaterial.
Alle chemischen Werte sind in Prozent ausgedrückt.
Die Anordnung der Proben folgt der gleichen Reihenfolge wie in der morphologischen Beschreibung des Materiales.
In Probe 1 treten z.B. 4o Keime/g Trockenmaterial auf, die fähig sind, Sulfat zu Sulfid zu reduzieren. Algen wurden nicht gefunden.
Im wässrigen Auszug der gleichen Probe wurden 2,63% Ca gefunden; der salzsaure Auszug enthielt 30,03% Ca.
In Probe 3 , die als Vergleichsprobe diente, wurden z.B. keine chemischen Werte bestimmt.

Nummer der Probe	1	2	3
Trocknungsverlust bei 110° C	unter 1%	unter 1%	unter 1%
Gesamtmikroflora	180 000 000	500 000	110 000 000
Pilze	130 000	1 400	25 000
Aktinomyceten	15 000	1 130	4 000
Algen	0	0	0
STICKSTOFFKREISLAUF			
Ammonifizierung	14 000 000	45 000	45 000 000
N-Fixierung aerob	25	0	25
N-Fixierung anaerob	13	25	13
Oxydation zu NO 2	9 500	20	1 150
Oxydation zu NO 3	11 500	15	2 000
SCHWEFELKREISLAUF			
Oxydation von S	1 000 000	25 000	450 000
Oxydation von H2S	25 000	13 000	11 000
Reduktion von SO4	40	20	0
Mineralisation	20	0	0
CHEMISMUS			
Ph vor Extraktion mit H2O	8,3	8,7	+
Ph nach Extraktion mit H2O	7,7	7,3	+
Unlöslicher Rückstand	3,7	0,58	+
HCl-Auszug Na	0,025	0,019	+
H2O-Auszug Na	0,014	0,006	+
HCl-Auszug K	0,022	0,012	+
H2O-Auszug K	0,012	0,003	+
HCl-Auszug Ca	30,03	37,60	+
H2O-Auszug Ca	2,63	0,01	+
HCl-Auszug Mg	0,36	0,33	+
H2O-Auszug Mg	0,16	0,00	+
HCl-Auszug Fe2	0,25	0,14	+
H2O-Auszug Fe2	0,00	0,00	+
HCl-Auszug Fe3	0,07	0,01	+
H2O-Auszug Fe3	0,00	0,00	+
H2O-Auszug Cl	0,00	0,00	+
H2O-Auszug NO3	0,46	0,06	+
H2O-Auszug SO4	5,8	0,6	+
HCl-Auszug SO4	0,1	0,00	+
Volumetrie CO3	38,7	39,1	+

Nummer der Probe	4	5	6
Trocknungsverlust bei 110° C	1,5	unter 1%	5%
Gesamtmikroflora	110 000 000	250 000 000	317 500 000
Pilze	20 000	25 100	11 200
Aktinomyceten	7 500	2 000	3 600
Algen	0	14	20
STICKSTOFFKREISLAUF			
Ammonifizierung	25 000 000	20 000 000	265 000 000
N-Fixierung aerob	500	250	36
N-Fixierung anaerob	35	80	4
Oxydation zu NO 2	250	000	1 000
Oxydation zu NO 3	250	000	260
SCHWEFELKREISLAUF			
Oxydation von S	75 000	45 000	474 000
Oxydation von H2S	4 500	2 000	26 000
Reduktion von SO4	0	0	47
Mineralisation	0	0	120
CHEMISMUS			
Ph vor Extraktion mit H2O	8,5	8,4	7,7
Ph nach Extraktion mit H2O	7,4	7,6	7,8
Unlöslicher Rückstand	43,62	30,91	36,31
HCl-Auszug Na	0,017	0,020	0,032
H2O-Auszug Na	0,030	0,008	0,011
HCl-Auszug K	0,104	0,193	0,072
H2O-Auszug K	0,078	0,037	0,035
HCl-Auszug Ca	16,60	21,00	10,83
H2O-Auszug Ca	0,970	0,890	2,47
HCl-Auszug Mg	00,00	0,00	0,20
H2O-Auszug Mg	0,00	0,00	0,17
HCl-Auszug Fe 2	0,59	0,66	0,46
H2O-Auszug Fe 2	0,0	0,0	0,0
HCl-Auszug Fe 3	0,54	0,52	0,91
H2O-Auszug Fe 3	0,0	0,0	0,0
H2O-Auszug Cl	0,0	0,0	0,0
H2O-Auszug NO3	0,13	0,00	0,73
H2O-Auszug SO4	1,90	1,87	5,7
HCl-Auszug SO4	0,0	0,0	2,2
Volumetrie CO3	17,8	22,4	8,1

Nummer der Probe	7	8	
Trocknungsverlust bei 110° C	unter 1%	unter 1%	
Gesamtmikroflora	150 000 000	450 000	
Pilze	780 000	60 000	
Aktinomyceten	17 000	3 500	
Algen	0	0	
STICKSTOFFKREISLAUF			
Ammonifizierung	75 000 000	200 000	
N-Fixierung aerob	0	0	
N-Fixierung anaerob	35	11	
Oxydation zu NO 2	950	25	
Oxydation zu NO 3	250	25	
SCHWEFELKREISLAUF			
Oxydation von S	150000	2 500	
Oxydation von H2S	4 500	250	
Reduktion von SO4	14	0	
Mineralisation	0	0	
CHEMISMUS			
Ph vor Extraktion mit H20	8,38	9,0	
Ph nach Extraktion mit H20	8,0	8,4	
Unlöslicher Rückstand	23,98	18,8	
HCl-Auszug Na	0,032	0,025	
H20-Auszug Na	0,038	0,015	
HCl-Auszug K	0,112	0,074	
H20-Auszug K	0,063	0,023	
HCl-Auszug Ca	20,76	30,66	
H20-Auszug Ca	2,85	0,31	
HCl-Auszug Mg	0,83	0,20	
H20-Auszug Mg	0,00	0,00	
HCl-Auszug Fe 2	0,25	0,43	
H20-Auszug Fe2	0,00	0,00	
HCl-Auszug Fe 3	0,89	0,43	
H20-Auszug Fe3	0,00	0,00	
H20-Auszug Cl	0,00	0,00	
H20-Auszug NO3	0,33	0,04	
H20-Auszug SO4	6,00	0,00	
HCl-Auszug SO4	2,40	0,00	
Volumetrie CO3	18,9	33,1	

Nummer der Probe	9	10
Trocknungsverlust bei 110° C	1,9%	1,5%
Gesamtmikroflora	968 000 000	710 000 000
Pilze	152 220	315 000
Aktinomyceten	20 380	162 000
Algen	0	0
STICKSTOFFKREISLAUF		
Ammonifizierung	254 750 000	253 750 000
N-Fixierung aerob	0	0
N-Fixierung anaerob	3	0
Oxydation zu NO 2	315	25
Oxydation zu NO 3	340	45
SCHWEFELKREISLAUF		
Oxydation von S	40 700	100
Oxydation von H2S	3 560	0
Reduktion von SO4	0	0
Mineralisation	0	0
CHEMISMUS		
Ph vor Extraktion mit H2O	8,2	9,1
Ph nach Extraktion mit H2O	8,0	8,2
Unlöslicher Rückstand	8,95	3,71
HCl-Auszug Na	0,025	0,022
H2O-Auszug Na	0,040	0,011
HCl-Auszug K	0,058	0,049
H2O-Auszug K	0,020	0,010
HCl-Auszug Ca	29,66	32,16
H2O-Auszug Ca	0,979	0,33
HCl-Auszug Mg	3,29	3,84
H2O-Auszug Mg	0,00	0,00
HCl-Auszug Fe 2	0,67	0,83
H2O-Auszug Fe 2	0,00	0,00
HCl-Auszug Fe 3	0,15	0,56
H2O-Auszug Fe 3	0,00	0,00
H2O-Auszug Cl	0,00	0,00
H2O-Auszug NO3	0,11	0,07
H2O-Auszug SO4	2,12	0,20
HCl-Auszug SO4	0,00	0,00
Volumetrie CO3	30,7	35,2

Nummer der Probe	11	12
Trocknungsverlust bei 110° C	unter 1%	unter 1%
Gesamtmikroflora	120 000 000	350 000 000
Pilze	500 000	750 000
Aktinomyceten	250 000	250 000
Algen	15	00
STICKSTOFFKREISLAUF		
Ammonifizierung	95 000 000	40 000 000
N-Fixierung aerob	40	35
N-Fixierung anaerob	8	500
Oxydation zu NO 2	450	250
Oxydation zu NO 3	950	95
SCHWEFELKREISLAUF		
Oxydation von S	7 500	95 000
Oxydation von H2S	9 500	120 000
Reduktion von SO4	0	3
Mineralisation	0	0
CHEMISMUS		
Ph vor Extraktion mit H20	8,4	8,7
Ph nach Extraktion mit H20	8,1	8,0
Unlöslicher Rückstand	17,15	3,0
HCl-Auszug Na	0,057	0,022
H20-Auszug Na	0,059	0,039
HCl-Auszug K	0,156	0,035
H20-Auszug K	0,104	0,045
HCl-Auszug Ca	17,33	28,33
H20-Auszug Ca	1,00	1,10
HCl-Auszug Mg	0,27	0,51
H20-Auszug Mg	0,00	0,00
HCl-Auszug Fe 2	0,31	0,21
H20-Auszug Fe 2	0,00	0,00
HCl-Auszug Fe3	1,08	0,04
H20-Auszug Fe 3	0,00	0,00
H20-Auszug Cl	0,00	0,00
H20-Auszug NO3	0,12	0,05
H20-Auszug SO4	1,12	2,04
HCl-Auszug SO4	0,00	0,00
Volumetrie CO3	3,2	3,3

Nummer der Probe	13	14
Trocknungsverlust bei 110° C	unter 1%	unter 1%
Gesamtmikroflora	250 000 000	3 500 000
Pilze	80 000	17 000
Aktinomyceten	450	250
Algen	0	0
STICKSTOFFKREISLAUF		
Ammonifizierung	150 000 000	2 500 000
N-Fixierung aerob	50	50
N-Fixierung anaerob	95	25
Oxydation zu NO 2	800	25
Oxydation zu NO 3	25	25
SCHWEFELKREISLAUF		
Oxydation von S	45 000	2 500
Oxydation von H2S	35 000	1 400
Reduktion von SO4	0	0
Mineralisation	0	0
CHEMISMUS		
Ph vor Extraktion mit H20	7,6	8,3
Ph nach Extraktion mit H20	6,5	7,2
Unlöslicher Rückstand	8,13	2,98
HCl-Auszug Na	0,024	0,020
H20-Auszug Na	0,012	0,014
HCl-Auszug K	0,035	0,021
H20-Auszug K	0,020	0,093
HCl-Auszug Ca	29,60	34,60
H20-Auszug Ca	2,50	1,73
HCl-Auszug Mg	0,18	0,14
H20-Auszug Mg	0,05	0,04
HCl-Auszug Fe2	0,28	0,19
H20-Auszug Fe2	0,0	0,0
HCl-Auszug Fe3	0,128	0,26
H20-Auszug Fe3	0,00	0,00
H20-Auszug Cl	0,00	Spuren
H20-Auszug NO3	0,06	0,06
H20-Auszug SO4	4,72	1,73
HCl-Auszug SO4	2,82	1,95
Volumetrie CO3	29,3	35,9

ummer der Probe	15	16	17
rocknungsverlust bei 110° C	6,04%	2,1 %	1,5%
esamtmikroflora	37 000 000	81 200	112 300 000
ilze	1 060 000	11 100	55 200
ktinomyceten	+	+	+
lgen	5	0	0
TICKSTOFFKREISLAUF			
mmonifizierung	21 200 000	25 370	25 300 000
-Fixierung aerob	5	0	0
-Fixierung anaerob	0	0	0
xydation zu NO 2	265	95	255
xydation zu NO 3	48	95	25
SCHWEFELKREISLAUF			
xydation von S	1 590	35	50
xydation von H2S	848	9	15
eduktion von SO4	0	0	0
ineralisation	0	0	0
HEMISMUS			
h vor Extraktion mit H20	8,6	8,4	8,7
h nach Extraktion mit H20	8,3	8,1	8,1
nlöslicher Rückstand	1,8	2,3	2,21
Cl-Auszug Na	0,022	0,018	0,022
20-Auszug Na	0,400	0,268	0,206
Cl-Auszug K	0,012	0,008	0,008
20-Auszug K	0,222	0,113	0,083
Cl-Auszug Ca	36,40	36,00	36,80
20-Auszug Ca	0,70	0,35	0,25
Cl-Auszug Mg	0,13	0,08	0,08
20-Auszug Mg	0,66	0,11	0,12
Cl-Auszug Fe2	0,142	0143	0,13
20-Auszug Fe2	0,00	0,00	0,00
Cl-Auszug Fe3	0,05	0,08	0,04
20-Auszug Fe3	0,00	0,00	0,00
20-Auszug Cl	Spuren	Spuren	Spuren
20-Auszug NO3	0,97	0,46	0,44
20-Auszug SO4	1,65	1,1	0,65
Cl-Auszug SO4	0,0	0,0	0,0
olumetrie CO3	37,2	36,4	39,8

Nummer der Probe	18	19	20
Trocknungsverlust bei 110° C	unter 1%	unter 1%	unter 1%
Gesamtmikroflora	450 000	450 000	5 000 000
Pilze	110 000	30 000	75 000
Aktinomyceten	95 000	45 000	15 000
Algen	14	0	9
STICKSTOFFKREISLAUF			
Ammonifizierung	300 000	150 000	4 500 000
N-Fixierung aerob	11	20	17
N-Fixierung anaerob	4	2	17
Oxydation zu NO 2	110	0	0
Oxydation zu NO 3	65	0	0
SCHWEFELKREISLAUF			
Oxydation von S	45 000	9 500	4 500
Oxydation von H2S	6 500	4 000	4 000
Reduktion von SO4	0	0	0
Mineralisation	0	0	0
CHEMISMUS			
Ph vor Extraktion mit H20	9,0	8,8	9,2
Ph nach Extraktion mit H20	8,8	8,2	8,8
Unlöslicher Rückstand	2,06	1,53	1,02
HCl-Auszug Na	0,022	0,021	0,019
H2O-Auszug Na	0,245	0,023	0,036
HCl-Auszug K	0,027	0,010	0,025
H2O-Auszug K	0,009	0,012	0,012
HCl-Auszug Ca	32,46	38,83	38,33
H2O-Auszug Ca	1,80	0,93	0,21
HCl-Auszug Mg	0,66	0,20	0,46
H2O-Auszug Mg	0,00	0,00	0,00
HCl-Auszug Fe2	0,26	0,13	0,17
H2O-Auszug Fe2	0,00	0,00	0,00
HCl-Auszug Fe3	0,26	0,07	0,37
H2O-Auszug Fe3	0,00	0,00	0,00
H2O-Auszug Cl	Spuren	0,0	0,0
H2O-Auszug NO3	0,16	0,10	0,10
H2O-Auszug SO4	4,2	1,2	0,6
HCl-Auszug SO4	0,0	0,0	0,0
Volumetrie CO3	35,8	42,5	42,0

Nummer der Probe	21
Trocknungsverlust bei 110° C	unter 1%
Gesamtmikroflora	80 000 000
Pilze	45 000
Aktinomyceten	0?
Algen	0
STICKSTOFFKREISLAUF	
Ammonifizierung	45 000 000
N-Fixierung aerob	17
N-Fixierung anaerob	25
Oxydation zu NO 2	250
Oxydation zu NO 3	90
SCHWEFELKREISLAUF	
Oxydation von S	25 000
Oxydation von H2S	9 000
Reduktion von SO4	0
Mineralisation	0
CHEMISMUS	
Ph vor Extraktion mit H20	8,6
Ph nach Extraktion mit H20	8,0
Unlöslicher Rückstand	12,6
HCl-Auszug Na	0,520
H2O-Auszug Na	0,057
HCl-Auszug K	0,083
H2O-Auszug K	0,052
HCl-Auszug Ca	24,90
H2O-Auszug Ca	2,44
HCl-Auszug Mg	0,74
H2O-Auszug Mg	0,09
HCl-Auszug Fe 2	0,62
H2O-Auszug Fe 2	0,00
HCl-Auszug Fe 3	0,70
H2O-Auszug Fe 3	0,00
H2O-Auszug Cl	Spuren
H2O-Auszug NO3	0,22
H2O-Auszug SO4	5,4
HCl-Auszug SO4	3,8
Volumetrie CO3	24,6

Nummer der Probe	22	23	24
Trocknungsverlust bei 110° C	unter 1%	unter 1%	unter 1%
Gesamtmikroflora	250 000 000	5 000 000	70 000 000
Pilze	2 500 000	25 000	400 000
Aktinomyceten	250 000	6 500	3 000
Algen	0	0	0
STICKSTOFFKREISLAUF			
Ammonifizierung	250 000 000	150 000	1 500 000
N-Fixierung aerob	130	50	25
N-Fixierung anaerob	2	2	2
Oxydation zu NO 2	250	4	250
Oxydation zu NO 3	95	25	250
SCHWEFELKREISLAUF			
Oxydation von S	75 000	450	250
Oxydation von H2S	950	1150	25
Reduktion von SO4	0	9	0
Mineralisation	0	0	0
CHEMISMUS			
Ph vor Extraktion mit H20	10,0	9,7	9,7
Ph nach Extraktion mit H20	8,5	8,5	8,5
Unlöslicher Rückstand	0,76	0,85	0,4
HCl-Auszug Na	0,019	0,017	0,019
H20-Auszug Na	0,197	0,124	0,157
HCl-Auszug K	0,010	0,010	0,008
H20-Auszug K	0,052	0,287	0,114
HCl-Auszug Ca	36,20	37,50	37,46
H20-Auszug Ca	0,65	0,41	0,45
HCl-Auszug Mg	0,42	0,40	0,25
H20-Auszug Mg	0,25	0,03	0,05
HCl-Auszug Fe 2	0,21	0,15	0,13
H20-Auszug Fe 2	0,00	0,00	0,00
HCl-Auszug Fe 3	0,06	0,04	0,02
H20-Auszug Fe 3	0,00	0,00	0,00
H20-Auszug Cl	Spuren	Spuren	Spuren
H20-Auszug NO3	0,27	0,08	0,14
H20-Auszug SO4	1,8	0,0	0,4
HCl-Auszug SO4	0,0	0,0	0,0
Volumetrie CO3	39,2	41,0	41,1

Nummer der Probe	25	26
Trocknungsverlust bei 110° C	2,6%	0,4%
Gesamtmikroflora	14 840 000	75 000 000
Pilze	4 770 000	115 000
Aktinomyceten	25 650	4 000
Algen	0	0
STICKSTOFFKREISLAUF		
Ammonifizierung	307 800	4 500 000
N-Fixierung aerob	35	17
N-Fixierung anaerob	25	11
Oxydation zu NO 2	25	115
Oxydation zu NO 3	0	150
SCHWEFELKREISLAUF		
Oxydation von S	7 950	200
Oxydation von H2S	265	14
Reduktion von SO4	9	0
Mineralisation	0	0
CHEMISMUS		
Ph vor Extraktion mit H2O	8,8	9,8
Ph nach Extraktion mit H2O	8,5	9,1
Unlöslicher Rückstand	3,15	2,31
HCl-Auszug Na	0,028	0,022
H2O-Auszug Na	0,148	0,008
HCl-Auszug K	0,103	0,014
H2O-Auszug K	0 022	0,004
HCl-Auszug Ca	34,20	37,73
H2O-Auszug Ca	1,95	0,24
HCl-Auszug Mg	0,21	0,20
H2O-Auszug Mg	0,05	0,04
HCl-Auszug Fe2	0,19	0,16
H2O-Auszug Fe2	0,00	0,00
HCl-Auszug Fe3	0,05	0,02
H2O-Auszug Fe3	0,00	0,00
H2O-Auszug Cl	0,1	Spuren
H2O-Auszug NO3	0,03	0,08
H2O-Auszug SO4	1,4	0,4
HCl-Auszug SO4	0,7	0,0
Volumetrie CO3	36,0	40,8

Nummer der Probe	27	28	29
Trocknungsverlust bei 110° C	unter 1%	unter 1%	unter 1%
Gesamtmikroflora	7 500 000	115 000	80 000 000
Pilze	250 000	25 000	4 000 000
Aktinomyceten	250 000	4 500	3 500
Algen	9	0	0
STICKSTOFFKREISLAUF			
Ammonifizierung	150 000	(750 000)	4 500 000
N-Fixierung aerob	35	35	170
N-Fixierung anaerob	45	150	250
Oxydation zu NO 2	12	130	250
Oxydation zu NO 3	16	25	170
SCHWEFELKREISLAUF			
Oxydation von S	45 000	9 500	750
Oxydation von H2S	250	650	250
Reduktion von SO4	0	0	0
Mineralisation	0	0	0
CHEMISMUS			
Ph vor Extraktion mit H20	9,1	9,8	9,5
Ph nach Extraktion mit H20	8,1	9,2	9,1
Unlöslicher Rückstand	7,2	11,4	2,3
HCl-Auszug Na	0,022	0,019	0,016
H20-Auszug Na	0,011	0,011	0,012
HCl-Auszug K	0,031	0,026	0,023
H20-Auszug K	0,020	0,010	0,010
HCl-Auszug Ca	32,20	24,00	37,93
H20-Auszug Ca	1,02	1,15	0,17
HCl-Auszug Mg	0,87	0,61	0,63
H20-Auszug Mg	0,00	0,00	0,00
HCl-Auszug Fe 2	0,55	0,65	0,32
H20-Auszug Fe 2	0,00	0,00	0,00
HCl-Auszug Fe 3	0,24	0,49	0,23
H20-Auszug Fe 3	0,00	0,00	0,00
H20-Auszug Cl	0,0	0,0	0,0
H20-Auszug NO3	0,08	0,04	0,06
H20-Auszug SO4	2,6	2,0	0,4
HCl-Auszug SO4	2,5	2,9	0,0
Volumetrie CO3	33,9	26,6	40,7

Nummer der Probe	30	31	32
Trocknungsverlust bei 110° C	unter 1%	unter1%	unter1%
Gesamtmikroflora	20 000 000	450 000	350 000 000
Pilze	250 000	9 500	25 000
Aktinomyceten	+	+	+
Algen	0	0	0
STICKSTOFFKREISLAUF			
Ammonifizierung	4 500 000	150 000	95 000 000
N-Fixierung aerob	0	0	35
N-Fixierung anaerob	25	0	0
Oxydation zu NO 2	950	45	95
Oxydation zu NO 3	150	25	95
SCHWEFELKREISLAUF			
Oxydation von S	450 000	250	15 000
Oxydation von H2S	250	15	350
Reduktion von SO4	45	0	0
Mineralisation	0	0	0
CHEMISMUS			
Ph vor Extraktion mit H20			
Ph nach Extraktion mit H20			
Unlöslicher Rückstand			
HCl-Auszug Na			
H20-Auszug Na			
HCl-Auszug K			
H20-Auszug K			
HCl-Auszug Ca			
H20-Auszug Ca	1,71	0,43	087
HCl-Auszug Mg			
H20-Auszug Mg			
HCl-Auszug Fe			
H20-Auszug Fe			
HCl-Auszug Fe			
H20-Auszug Fe			
H20-Auszug Cl			
H20-Auszug NO3			
H20-Auszug SO4	3,2	o,2	1,2
HCl-Auszug SO4			
Volumetrie CO3			

Nummer der Probe	33	34	35
Trocknungsverlust bei 110° C	1,91 %	1,1	0,8%
Gesamtmikroflora	5 095 000	2 027 000	25 000 000
Pilze	25 400	40400	15 000
Aktinomyceten	+	+	450
Algen	0	0	0
STICKSTOFFKREISLAUF			
Ammonifizierung	76 400	407 600	1 150 000
N-Fixierung aerob	40	450	17
N-Fixierung anaerob	0	9	0
Oxydation zu NO 2	254	550	45
Oxydation zu NO 3	254	450	45
SCHWEFELKREISLAUF			
Oxydation von S	45 850	96 400	45 000
Oxydation von H2S	650	4 500	750
Reduktion von SO4	0	0	0
Mineralisation	0	0	0
CHEMISMUS			
Ph vor Extraktion mit H2O			
Ph nach Extraktion mit H2O			
Unlöslicher Rückstand			
HCl-Auszug Na			
H2O-Auszug Na			
HCl-Auszug K			
H2O-Auszug K			
HCl-Auszug Ca			
H2O-Auszug Ca	0,69	0,82	+
HCl-Auszug Mg			
H2O-Auszug Mg			
HCl-Auszug Fe			
H2O-Auszug Fe			
HCl-Auszug Fe			
H2O-Auszug Fe			
H2O-Auszug Cl			
H2O-Auszug NO3			
H2O-Auszug SO4	1,4	1,7	+
HCl-Auszug SO4			
Volumetrie CO3			

Nummer der Probe	36	37
Trocknungsverlust bei 110° C	1,5 %	3,1%
Gesamtmikroflora	46 350 000	5 150 000
Pilze	8 000	1 140
Aktinomyceten	2 000	800
Algen	25	9
STICKSTOFFKREISLAUF		
Ammonifizierung	309 000	144 000
N-Fixierung aerob	25	25
N-Fixierung anaerob	0	0
Oxydation zu NO 2	250	25
Oxydation zu NO 3	150	14
SCHWEFELKREISLAUF		
Oxydation von S	170	40
Oxydation von H2S	46	0
Reduktion von SO4	0	0
Mineralisation	0	0
CHEMISMUS		
Ph vor Extraktion mit H20	8,8	9,1
Ph nach Extraktion mit H20	8,3	8,7
Unlöslicher Rückstand	11,7	3,8
HCl-Auszug Na	0,021	0,025
H20-Auszug Na	0,035	0,014
HCl-Auszug K	0,010	0,021
H20-Auszug K	0,008	0,011
HCl-Auszug Ca	27,43	33,40
H20-Auszug Ca	0,96	0,34
HCl-Auszug Mg	0,24	0,17
H20-Auszug Mg	0,00	0,00
HCl-Auszug Fe2	0,45	0,34
H20-Auszug Fe2	0,00	0,00
HCl-Auszug Fe3	0,23	0,47
H20-Auszug Fe3	0,00	0,00
H20-Auszug Cl	0,00	0,00
H20-Auszug NO3	0,23	0,09
H20-Auszug SO4	0,8	0,2
HCl-Auszug SO4	0,0	0,0
Volumetrie CO3	29,5	37,4

Nummer der Probe	38	39
Trocknungsverlust bei 110° C	unter 1%	unter 1%
Gesamtmikroflora	130 000	22 000
Pilze	4 500	650
Aktinomyceten	250	13
Algen	0	0
STICKSTOFFKREISLAUF		
Ammonifizierung	115 000	15 000
N-Fixierung aerob	8	0
N-Fixierung anaerob	5	0
Oxydation zu NO 2	95	25
Oxydation zu NO 3	25	25
SCHWEFELKREISLAUF		
Oxydation von S	60	0
Oxydation von H2S	40	0
Reduktion von SO4	0	0
Mineralisation	0	0
CHEMISMUS		
Ph vor Extraktion mit H20	9,4	9,3
Ph nach Extraktion mit H20	8,8	9,1
Unlöslicher Rückstand	2,18	2,20
HCl-Auszug Na	0,020	0,021
H20-Auszug Na	0,106	0,029
HCl-Auszug K	0,026	0,033
H20-Auszug K	0,042	0,20
HCl-Auszug Ca	31,33	32,00
H20-Auszug Ca	0,13	0,07
HCl-Auszug Mg	0,06	0,32
H20-Auszug Mg	0,00	0,00
HCl-Auszug Fe^2	0,18	0,26
H20-Auszug Fe^2	0,00	0,00
HCl-Auszug Fe^3	0,06	0,05
H20-Auszug Fe^3	0,00	0,00
H20-Auszug Cl	0,05	0,00
H20-Auszug NO3	0,08	0,14
H20-Auszug SO4	0,2	0,2
HCl-Auszug SO4	0,0	0,0
Volumetrie CO3	33,8	38,0

Nummer der Probe	40	41		
Trocknungsverlust bei 110° C	Unter 1%	unter 1%		
Gesamtmikroflora	115 000	25 000		
Pilze	3 500	2 500		
Aktinomyceten	1 400	900		
Algen	0	0		
STICKSTOFFKREISLAUF				
Ammonifizierung	45 000	3 000		
N-Fixierung aerob	80	0		
N-Fixierung anaerob	150	30		
Oxydation zu NO 2	450	95		
Oxydation zu NO 3	450	30		
SCHWEFELKREISLAUF				
Oxydation von S	250	0		
Oxydation von H2S	0	0		
Reduktion von SO4	0	0		
Mineralisation	0	0		
CHEMISMUS				
Ph vor Extraktion mit H2O	9,2	9,4		
Ph nach Extraktion mit H2O	8,6	9,4		
Unlöslicher Rückstand	4,20	0,71		
HCl-Auszug Na	0,20	0,018		
H2O-Auszug Na	0,017	0,007		
HCl-Auszug K	0,049	0,008		
H2O-Auszug K	0,016	0,005		
HCl-Auszug Ca	35,23	38,76		
H2O-Auszug Ca	0,30	0,24		
HCl-Auszug Mg	0,65	0,52		
H2O-Auszug Mg	0,00	0,00		
HCl-Auszug Fe2	0,20	0,17		
H2O-Auszug Fe2	0,00	0,00		
HCl-Auszug Fe3	0,33	0,06		
H2O-Auszug Fe3	0,00	0,00		
H2O-Auszug Cl	0,0	0,0		
H2O-Auszug NO3	0,15	0,12		
H2O-Auszug SO4	0,2	0,0		
HCl-Auszug SO4	0,0	0,0		
Volumetrie CO3	38,0	41,7		

Nummer der Probe	42	43	46
Trocknungsverlust bei 110° C	1,4 %	1,5%	2,1%
Gesamtmikroflora	1 780 000	141 600	2 500000
Pilze	6 950	700	15000
Aktinomyceten	253	45	4000
Algen	6	0	9
STICKSTOFFKREISLAUF			
Ammonifizierung	760 000	25 300	14000
N-Fixierung aerob	85	2	20
N-Fixierung anaerob	35	0	0
Oxydation zu NO 2	960	24	150
Oxydation zu NO 3	455	15	950
SCHWEFELKREISLAUF			
Oxydation von S	90	0	250
Oxydation von H2S	16	0	130
Reduktion von SO4	0	0	0
Mineralisation	0	0	0
CHEMISMUS			
Ph vor Extraktion mit H2O	8,4	9,7	6,4
Ph nach Extraktion mit H2O	7,1	8,7	6,0
Unlöslicher Rückstand	40,9	35,68	78,55
HCl-Auszug Na	0,024	0,022	0,016
H2O-Auszug Na	0,033	0,005	0,416
HCl-Auszug K	0,291	0,200	0,068
H2O-Auszug K	0,191	0,070	0,242
HCl-Auszug Ca	16,33	20,80	0,35
H2O-Auszug Ca	1,26	0,11	1,29
HCl-Auszug Mg	0,15	0,23	0,74
H2O-Auszug Mg	0,00	0,00	0,04
HCl-Auszug Fe 2	0,59	0,54	0,57
H2O-Auszug Fe 2	0,00	0,00	0,00
HCl-Auszug Fe 3	1,02	0,93	0,27
H2O-Auszug Fe 3	0,00	0,00	0,00
H2O-Auszug Cl	Spuren	0,0	0,4
H2O-Auszug NO3	0,18	0,08	2,2
H2O-Auszug SO4	3,2	0,2	0,4
HCl-Auszug SO4	0,0	0,0	0,0
Volumetrie CO3	17,4	21,2	+

Nummer der Probe	47	48	49
Trocknungsverlust bei 110° C	10%	unter 1%	unter 1%
Gesamtmikroflora	51 000 000	4 500 000	150 000
Pilze	70 000	3 500	900
Aktinomyceten	14 000	450	110
Algen	14	6	0
STICKSTOFFKREISLAUF			
Ammonifizierung	1 420 000	950 000	7 500
N-Fixierung aerob	60	50	0
N-Fixierung anaerob	0	0	0
Oxydation zu NO 2	255	450	25
Oxydation zu NO 3	10	1500	90
SCHWEFELKREISLAUF			
Oxydation von S	27	2 500	25
Oxydation von H2S	3	600	9
Reduktion von SO4	0	0	0
Mineralisation	0	0	0
CHEMISMUS			
Ph vor Extraktion mit H20	6,0	6,7	7,0
Ph nach Extraktion mit H20	6,0	6,7	6,3
Unlöslicher Rückstand	76 ,93	81,7	87,4
HCl-Auszug Na	0,017	0,025	0,018
H20-Auszug Na	0,412	0,293	0,249
HCl-Auszug K	0,069	0,056	0,044
H20-Auszug K	0,231	0,012	0,028
HCl-Auszug Ca	0,33	0,26	0,26
H20-Auszug Ca	1,18	1,71	0,23
HCl-Auszug Mg	0,90	1,51	1,41
H20-Auszug Mg	0,00	0,07	0,00
HCl-Auszug Fe	1,61	1,06	1,26
H20-Auszug Fe ^{2}	0,00	0,00	0,00
HCl-Auszug Fe ^{3}	0,78	0,80	0,84
H20-Auszug Fe ^{3}	0,00	0,00	0,00
H20-Auszug Cl	0,0	Spuren	0,0
H20-Auszug NO3	1,09	0,40	0,34
H20-Auszug SO4	0,8	1,40	0,30
HCl-Auszug SO4	0,0	0,0	0,0
Volumetrie CO3	+	+	+

Nummer der Probe	50	51	52
Trocknungsverlust bei 110° C	unter 1%	unter 1%	1,5%
Gesamtmikroflora	20 000 000	7 500 000	3 750 000
Pilze	450 000	250 000	35 700
Aktinomyceten	1 150	25 000	30 450
Algen	4	0	0
STICKSTOFFKREISLAUF			
Ammonifizierung	1 500 000	4 500 000	2 530 000
N-Fixierung aerob	0	0	135
N-Fixierung anaerob	95	350	253
Oxydation zu NO 2	950	350	4560
Oxydation zu NO 3	250	95	2530
SCHWEFELKREISLAUF			
Oxydation von S	0	0	250
Oxydation von H2S	0	0	900
Reduktion von SO4	0	0	25
Mineralisation	0	0	0
CHEMISMUS			
Ph vor Extraktion mit H20	8,3	6,5	7,8
Ph nach Extraktion mit H20	7,7	6,2	7,2
Unlöslicher Rückstand	83,00	85,21	82,11
HCl-Auszug Na	0,030	0,019	0,020
H20-Auszug Na	0,498	0,288	0,029
HCl-Auszug K	0,075	0,048	0,060
H20-Auszug K	0,060	0,014	0,010
HCl-Auszug Ca	0,76	0,20	2,81
H20-Auszug Ca	0,30	0,13	1,66
HCl-Auszug Mg	1,21	1,33	0,60
H20-Auszug Mg	0,00	0,04	0,10
HCl-Auszug Fe^2	1,42	1,20	0,77
H20-Auszug Fe^2	0,00	0,00	0,00
HCl-Auszug Fe^3	1,70	2,10	1,09
H20-Auszug Fe^3	0,00	0,00	0,00
H20-Auszug Cl	0,1	Spuren	0,0
H20-Auszug NO3	0,36	0,31	0,72
H20-Auszug SO4	0,4	0,0	2,10
HCl-Auszug SO4	0,0	0,0	0,0
Volumetrie CO3	+	+	+

Nummer der Probe	53	54		
Trocknungsverlust bei 110° C	unter 1%	unter 1%		
Gesamtmikroflora	110 000	2 500 000		
Pilze	60 000	45 000		
Aktinomyceten	3 500	7 000		
Algen	0	0		
STICKSTOFFKREISLAUF				
Ammonifizierung	95 000	450 000		
N-Fixierung aerob	0	5		
N-Fixierung anaerob	8	85		
Oxydation zu NO 2	1 150	250		
Oxydation zu NO 3	950	350		
SCHWEFELKREISLAUF				
Oxydation von S	0	0		
Oxydation von H2S	0	0		
Reduktion von SO4	0	0		
Mineralisation	0	0		
CHEMISMUS				
Ph vor Extraktion mit H20	7,3	7,6		
Ph nach Extraktion mit H20	6,3	5,3		
Unlöslicher Rückstand	71,18	85,81		
HCl-Auszug Na	0,017	0,017		
H20-Auszug Na	0,058	0,120		
HCl-Auszug K	0,042	0,065		
H20-Auszug K	0,008	0,012		
HCl-Auszug Ca	0,26	1,33		
H20-Auszug Ca	0,70	2,33		
HCl-Auszug Mg	1,45	1,04		
H20-Auszug Mg	0,10	0,06		
HCl-Auszug Fe 2	1,17	1,09		
H20-Auszug Fe 2	0,00	0,00		
HCl-Auszug Fe 3	1,28	0,94		
H20-Auszug Fe 3	0,00	0,00		
H20-Auszug Cl	0,0	Spuren		
H20-Auszug NO3	0,84	0,24		
H20-Auszug SO4	0,9	3,2		
HCl-Auszug SO4	0,0	0,0		
Volumetrie CO3	+	+		

Nummer der Probe	55	56	57
Trocknungsverlust bei 110° C	1,3 %	unter 1%	unter1%
Gesamtmikroflora	4 558 000	1 109 000	4 450 000
Pilze	253 200	40 000	115 000
Aktinomyceten	9 110	950	6 500
Algen	0	0	0
STICKSTOFFKREISLAUF			
Ammonifizierung	962 000	252 200	250 000
N-Fixierung aerob	30	0	4
N-Fixierung anaerob	0	5	25
Oxydation zu NO 2	3 500	250	250
Oxydation zu NO 3	250	250	40
SCHWEFELKREISLAUF			
Oxydation von S	0	0	160
Oxydation von H2S	0	0	0
Reduktion von SO4	0	0	0
Mineralisation	0	0	0
CHEMISMUS			
Ph vor Extraktion mit H20	6,7	7,1	+
Ph nach Extraktion mit H20	6,5	6,8	+
Unlöslicher Rückstand	70,3	83,6	+
HCl-Auszug Na	0,039	0,024	+
H2O-Auszug Na	0,416	0,169	+
HCl-Auszug K	0,063	0,071	+
H2O-Auszug K	0,239	0,189	+
HCl-Auszug Ca	1,33	1,80	+
H2O-Auszug Ca	3,23	0,35	+
HCl-Auszug Mg	0,40	0,60	+
H2O-Auszug Mg	0,10	0,06	+
HCl-Auszug Fe 2	1,09	1,04	+
H2O-Auszug Fe 2	0,00	0,00	+
HCl-Auszug Fe 3	0,25	0,44	+
H2O-Auszug Fe 3	0,00	0,00	+
H2O-Auszug Cl	0,25	0,0	+
H2O-Auszug NO3	0,74	0,24	+
H2O-Auszug SO4	0,96	0,32	+
HCl-Auszug SO4	0,44	0,0	+
Volumetrie CO3	+	+	+

Nummer der Probe	58	59	60
Trocknungsverlust bei 110° C	unter 1%	unter 1%	unter 1%
Gesamtmikroflora	1 150	25 000	1 400 000
Pilze	900	25 000	750 000
Aktinomyceten	0	400	14000
Algen	0	0	0
STICKSTOFFKREISLAUF			
Ammonifizierung	450	2 500	250 000
N-Fixierung aerob	0	0	5
N-Fixierung anaerob	0	0	0
Oxydation zu NO 2	0	25	450
Oxydation zu NO 3	0	0	25
SCHWEFELKREISLAUF			
Oxydation von S	o	0	0
Oxydation von H2S	0	0	0
Reduktion von SO4	0	0	0
Mineralisation	0	0	0
CHEMISMUS			
Ph vor Extraktion mit H2O	6,1		
Ph nach Extraktion mit H2O	5,8		
Unlöslicher Rückstand	90,8		
HCl-Auszug Na	0,021		
H2O-Auszug Na	0,007		
HCl-Auszug K	0,079		
H2O-Auszug K	0,008		
HCl-Auszug Ca	0,85		
H2O-Auszug Ca	0,05		
HCl-Auszug Mg	0,92		
H2O-Auszug Mg	0,02		
HCl-Auszug Fe 2	046		
H2O-Auszug Fe 2	0,00		
HCl-Auszug Fe 3	0,87		
H2O-Auszug Fe 3	0,00		
H2O-Auszug Cl	0,0		
H2O-Auszug NO3	0,15		
H2O-Auszug SO4	0,20		
HCl-Auszug SO4	0,00		
Volumetrie CO3	0,0		

Nummer der Probe	61	62	63
Trocknungsverlust bei 110° C	1,9%	3%	1,2%
Gesamtmikroflora	6 110	2570	1 100
Pilze	2 570 000	305 000	151 800
Aktinomyceten	25 700	45 850	25 300
Algen	0	0	0
STICKSTOFFKREISLAUF			
Ammonifizierung	2 540	275	150
N-Fixierung aerob	0	2	2
N-Fixierung anaerob	0	0	4
Oxydation zu NO 2	458	4 630	2 530
Oxydation zu NO 3	458	237	150
SCHWEFELKREISLAUF			
Oxydation von S	237	95	90
Oxydation von H2S	45	0	0
Reduktion von SO4	0	0	0
Mineralisation	0	3	0
CHEMISMUS			
Ph vor Extraktion mit H20	5,9	6,5	5,9
Ph nach Extraktion mit H20	5,0	5,7	5,2
Unlöslicher Rückstand	80,9	91,25	79,81
HCl-Auszug Na	0,014	0,015	0,012
H2O-Auszug Na	0,084	0,122	0,042
HCl-Auszug K	0,067	0,083	0,049
H2O-Auszug K	0,010	0,012	0,016
HCl-Auszug Ca	0,20	0,25	0,1
H2O-Auszug Ca	1,36	0,95	0,91
HCl-Auszug Mg	1,70	1,78	1,80
H2O-Auszug Mg	0,00	0,00	0,02
HCl-Auszug Fe 2	1,26	1,30	1,37
H2O-Auszug Fe 2	0000	0,00	0,00
HCl-Auszug Fe 3	1,16	1,53	1,50
H2O-Auszug Fe 3	0,45	0,41	0,00
H2O-Auszug Cl	Spuren	0,0	Spuren
H2O-Auszug NO3	0,99	1,09	1,25
H2O-Auszug SO4	0,2	0,9	0,4
HCl-Auszug SO4	0,0	0,0	0,0
Volumetrie CO3	+	+	+

Nummer der Probe	64	65	66
Trocknungsverlust bei 110° C	unter 1%	unter 1%	1,2%
Gesamtmikroflora	350 000	350 000	60 000
Pilze	7 500	9 500	25 000
Aktinomyceten	2 500	2 500	3 000
Algen	0	0	0
STICKSTOFFKREISLAUF			
Ammonifizierung	950	2 500	750
N-Fixierung aerob	13	7	2
N-Fixierung anaerob	0	0	0
Oxydation zu NO 2	950	250	150
Oxydation zu NO 3	450	450	60
SCHWEFELKREISLAUF			
Oxydation von S	0	250	45
Oxydation von H2S	0	65	0
Reduktion von SO4	0	0	0
Mineralisation	0	0	0
CHEMISMUS			
Ph vor Extraktion mit H20	6,5	7,6	7,9
Ph nach Extraktion mit H20	5,6	6,3	5,9
Unlöslicher Rückstand	87,7	83,91	89,43
HCl-Auszug Na	0,005	0,006	0,005
H2O-Auszug Na	0,070	0,103	0,033
HCl-Auszug K	0,100	0,092	0,112
H2O-Auszug K	0,034	0,029	0,030
HCl-Auszug Ca	0,16	0,20	0,10
H2O-Auszug Ca	1,20	2,03	0,56
HCl-Auszug Mg	0,82	0,52	0,81
H2O-Auszug Mg	0,06	0,10	0,04
HCl-Auszug Fe2	0,52	0,48	0,67
H2O-Auszug Fe2	0,00	0,00	0,00
HCl-Auszug Fe3	1,05	1,10	0,92
H2O-Auszug Fe3	0,00	0,00	0,00
H2O-Auszug Cl	0,0	Spuren	0,0
H2O-Auszug NO3	0,93	1,20	0,49
H2O-Auszug SO4	0,1	1,2	0,8
HCl-Auszug SO4	0,0	0,0	0,0
Volumetrie CO3	+	+	+

Nummer der Probe	67	68	69
Trocknungsverlust bei 110° C	unter 1%	unter 1%	unter 1%
Gesamtmikroflora	2 500 000	140 000	25 000
Pilze	85 000	12 000	4 500
Aktinomyceten	17 500	6000	4 000
Algen	0	0	0
STICKSTOFFKREISLAUF			
Ammonifizierung	1 500 000	45 000	7 500
N-Fixierung aerob	0	25	0
N-Fixierung anaerob	0	2	0
Oxydation zu NO 2	750	95	1 150
Oxydation zu NO 3	25	0	950
SCHWEFELKREISLAUF			
Oxydation von S	450	2 000	250
Oxydation von H2S	650	950	140
Reduktion von SO4	0	0	0
Mineralisation	0	0	0
CHEMISMUS			
Ph ver Extraktion mit H20	6,1	6,8	6,4
Ph nach Extraktion mit H20	6,3	6,4	6,4
Unlöslicher Rückstand	87,7	88,35	88,45
HCl-Auszug Na	0,014	0,014	0,012
H2O-Auszug Na	0,013	0,012	0,028
HCl-Auszug K	0,083	0,081	0,083
H2O-Auszug K	0,023	0,027	0,027
HCl-Auszug Ca	0,18	0,40	0,13
H2O-Auszug Ca	0,08	0,33	0,17
HCl-Auszug Mg	1,13	1,26	0,40
H2O-Auszug Mg	0,00	0,05	0,00
HCl-Auszug Fe2	1,14	1,09	1,14
H2O-Auszug Fe2	0,00	0,00	0,00
HCl-Auszug Fe 3	0,23	0,43	0,15
H2O-Auszug Fe 3	0,00	0,00	0,00
H2O-Auszug Cl	0,0	0,0	0,0
H2O-Auszug NO3	0,18	0,27	0,33
H2O-Auszug SO4	0,1	0,8	0,4
HCl-Auszug SO4	0,0	0,0	0,0
Volumetrie CO3	+	+	+

Nummer der Probe	70	71	72
Trocknungsverlust bei 110° C	unter 1%	unter1 %	unter1%
Gesamtmikroflora	17 500 000	1 200 000	300 000
Pilze	115 000	16 000	9 500
Aktinomyceten	200 000	15 000	750
Algen	0	0	0
STICKSTOFFKREISLAUF			
Ammonifizierung	950 000	75 000	11 500
N-Fixierung aerob	50	35	0
N-Fixierung anaerob	75	40	0
Oxydation zu NO 2	1 150	950	450
Oxydation zu NO 3	950	400	110
SCHWEFELKREISLAUF			
Oxydation von S	450	450	25
Oxydation von H2S	115	300	0
Reduktion von SO4	0	0	0
Mineralisation	0	4	0
CHEMISMUS			
Ph vor Extraktion mit H20			
Ph nach Extraktion mit H20			
Unlöslicher Rückstand			
HCl-Auszug Na			
H2O-Auszug Na			
HCl-Auszug K			
H2O-Auszug K			
HCl-Auszug Ca			
H2O-Auszug Ca			
HCl-Auszug Mg			
H2O-Auszug Mg			
HCl-Auszug Fe			
H2O-Auszug Fe			
HCl-Auszug Fe			
H2O-Auszug Fe			
H2O-Auszug Cl			
H2O-Auszug NO3			
H2O-Auszug SO4			
HCl-Auszug SO4			
Volumetrie CO3			

Nummer der Probe	73	74	75
Trocknungsverlust bei 110° C	1,8 %	3,1 %	1,7%
Gesamtmikroflora	118 000 000	17 000 000	13 000 000
Pilze	4 630 000	117 000	267 000
Aktinomyceten	25 700	2 540	26 700
Algen	0	0	0
STICKSTOFFKREISLAUF			
Ammonifizierung	97 900 000	76 300	1 525 000
N-Fixierung aerob	5	0	14
N-Fixierung anaerob	0	0	90
Oxydation zu NO 2	979	967	26700
Oxydation zu NO 3	250	254	2600
SCHWEFELKREISLAUF			
Oxydation von S	25	0	7 600
Oxydation von H2S	0	0	150
Reduktion von SO4	0	0	0
Mineralisation	0	0	0
CHEMISMUS			
Ph vor Extraktion mit H2O	6,7	7,3	8,0
Ph nach Extraktion mit H2O	6,7	6,5	6,9
Unlöslicher Rückstand	87,16	89,06	81,75
HCl-Auszug Na	0,010	0,010	0,017
H2O-Auszug Na	0,006	0,004	0,008
HCl-Auszug K	0,129	0,123	0,094
H2O-Auszug K	0,023	0,019	0,025
HCl-Auszug Ca	0,40	0,16	0,86
H2O-Auszug Ca	0,40	0,10	1,10
HCl-Auszug Mg	2,06	1,37	1,37
H2O-Auszug Mg	0,03	0,00	0,23
HCl-Auszug Fe2	0,79	0178	1,31
H2O-Auszug Fe 2	0,00	0,00	0,00
HCl-Auszug Fe 3	0,11	0,58	0,54
H2O-Auszug Fe 3	0,00	0,00	0,00
H2O-Auszug Cl	0,0	0,0	0,0
H2O-Auszug NO3	0,23	0,12	0,12
H2O-Auszug SO4	0,0	0,4	1,0
HCl-Auszug SO4	0,0	0,0	0,0
Volumetrie CO3	+	+	+

Nummer der Probe	76	77
Trocknungsverlust bei 110° C	unter 1%	unter 1%
Gesamtmikroflora	35 000	50 000
Pilze	9 000	2 500
Aktinomyceten	45	65
Algen	3	0
STICKSTOFFKREISLAUF		
Ammonifizierung	950	15 000
N-Fixierung aerob	0	0
N-Fixierung anaerob	0	0
Oxydation zu NO 2	0	65
Oxydation zu NO 3	25	450
SCHWEFELKREISLAUF		
Oxydation von S	0	0
Oxydation von H2S	0	0
Reduktion von SO4	0	0
Mineralisation	0	0
CHEMISMUS		
Ph vor Extraktion mit H20	9,5	8,1
Ph nach Extraktion mit H20	9,3	8,0
Unlöslicher Rückstand	91,33	89,45
HCl-Auszug Na	0,020	0,017
H20-Auszug Na	0,016	0,012
HCl-Auszug K	0,098	0,047
H20-Auszug K	0,012	0,020
HCl-Auszug Ca	0,83	0,91
H20-Auszug Ca	0,07	0,10
HCl-Auszug Mg	0,89	0,97
H20-Auszug Mg	0,00	0,00
HCl-Auszug Fe2	0,49	1,10
H20-Auszug Fe2	0,00	0,00
HCl-Auszug Fe3	0,84	0,73
H20-Auszug Fe3	0,00	0,00
H20-Auszug Cl	0,0	0,0
H20-Auszug NO3	0,16	0,09
H20-Auszug SO4	0,1	0,2
HCl-Auszug SO4	0,0	0,0
Volumetrie CO3	+	+

Nummer der Probe	78	79	80
Trocknungsverlust bei 110° C	1,1%	1,8%	1,1%
Gesamtmikroflora	13 140 000	2 545 000	2 520
Pilze	2 520 000	6 200	960
Aktinomyceten	2 520	+	+
Algen	8	0	0
STICKSTOFFKREISLAUF			
Ammonifizierung	960 000	30 540	150
N-Fixierung aerob	13	0	2
N-Fixierung anaerob	250	2	2
Oxydation zu NO 2	150	25 450	252
Oxydation zu NO 3	758	967	960
SCHWEFELKREISLAUF			
Oxydation von S	25	0	0
Oxydation von H2S	0	0	0
Reduktion von SO4	2	0	0
Mineralisation	0	0	0
CHEMISMUS			
Ph vor Extraktion mit H20	6,9	6,7	6,8
Ph nach Extraktion mit H20	6,3	5,0	5,3
Unlöslicher Rückstand	90,20	80,38	87,13
HCl-Auszug Na	0,007	0,007	0,005
H2O-Auszug Na	0,008	0,028	0,017
HCl-Auszug K	0,154	0,233	0,164
H2O-Auszug K	0,068	0,038	0,025
HCl-Auszug Ca	0,15	0,16	0,03
H2O-Auszug Ca	0,38	0,53	0,32
HCl-Auszug Mg	0,68	1,13	0,30
H2O-Auszug Mg	0,00	0,04	0,03
HCl-Auszug Fe^2	0,49	0,79	0,49
H2O-Auszug Fe^2	0,34	0,00	0,00
HCl-Auszug Fe^3	0,88	0,52	0,34
H2O-Auszug Fe^3	0,02	0,00	0,00
H2O-Auszug Cl	1,2	0,0	0,0
H2O-Auszug NO3	0,45	0,47	0,35
H2O-Auszug SO4	0,4	0,0	0,0
HCl-Auszug SO4	0,0	0,0	0,0
Volumetrie CO3	+	+	+

Nummer der Probe	81	82	83
Trocknungsverlust bei 110° C	unter 1%	unter 1%	unter 1%
Gesamtmikroflora	110 000	5 000 000	3 500 000
Pilze	2 500	75 000	75 000
Aktinomyceten	120	250	1 100
Algen	0	0	0
STICKSTOFFKREISLAUF			
Ammonifizierung	4 500	250 000	115 000
N-Fixierung aerob	0	8	0
N-Fixierung anaerob	17	0	0
Oxydation zu NO 2	450	45	25
Oxydation zu NO 3	95	25	9
SCHWEFELKREISLAUF			
Oxydation von S	95	450	250
Oxydation von H2S	0	0	0
Reduktion von SO4	0	0	0
Mineralisation	0	0	0
CHEMISMUS			
Ph vor Extraktion mit H20	9,0	7,0	8,3
Ph nach Extraktion mit H20	7,1	6,2	6,8
Unlöslicher Rückstand	85,13	91,31	91,70
HCl-Auszug Na	0,011	0,005	0,004
H2O-Auszug Na	0,512	0,011	0,007
HCl-Auszug K	0,219	0,141	0,112
H2O-Auszug K	0,314	0,033	0,024
HCl-Auszug Ca	0,26	0,16	0,15
H2O-Auszug Ca	0,36	0,27	0,00
HCl-Auszug Mg	1,33	0,51	0,33
H2O-Auszug Mg	0,05	0,00	0,00
HCl-Auszug Fe 2	0,81	0,70	0,73
H2O-Auszug Fe 2	0,00	0,00	0,00
HCl-Auszug Fe 3	0,49	0,28	0,38
H2O-Auszug Fe 3	0,00	0,00	0,00
H2O-Auszug Cl	0,76	0,0	0,0
H2O-Auszug NO3	0,87	0,13	0,18
H2O-Auszug SO4	0,62	0,6	0,1
HCl-Auszug SO4	0,0	0,0	0,0
Volumetrie CO3	+	+	+

Nummer der Probe	84	85
Trocknungsverlust bei 110° C	1,5%	1 %
Gesamtmikroflora	115 000	115 600
Pilze	25 375	2 500
Aktinomyceten	7 600	450
Algen	14	0
STICKSTOFFKREISLAUF		
Ammonifizierung	77 000	76 000
N-Fixierung aerob	38	17
N-Fixierung anaerob	0	2
Oxydation zu NO 2	406	25
Oxydation zu NO 3	253	25
SCHWEFELKREISLAUF		
Oxydation von S	4 600	950
Oxydation von H2S	253	450
Reduktion von SO4	3	0
Mineralisation	0	0
CHEMISMUS		
Ph vor Extraktion mit H20	10,1	9,5
Ph nach Extraktion mit H20	8,1	8,8
Unlöslicher Rückstand	0,96	0,91
HCl-Auszug Na	0,018	0,015
H20-Auszug Na	0,565	0,120
HCl-Auszug K	0,008	0,005
H20-Auszug K	0,018	0,015
HCl-Auszug Ca	33,30	37,26
H20-Auszug Ca	1,34	0,63
HCl-Auszug Mg	0,32	0,43
H20-Auszug Mg	0,54	0,08
HCl-Auszug Fe 2	0,62	0,25
H20-Auszug Fe 2	0,00	0,00
HCl-Auszug Fe 3	0,11	0,00
H20-Auszug Fe 3	0,00	0,00
H20-Auszug Cl	Spuren	Spuren
H20-Auszug NO3	2,03	0,56
H20-Auszug SO4	2,4	1,3
HCl-Auszug SO4	0,0	0,0
Volumetrie CO3	36,7	39,9

Nummer der Probe	86	87
Trocknungsverlust bei 110° C	16,6	2,6
Gesamtmikroflora	812 000	80 000 000
Pilze	2 800	45 900
Aktinomyceten	750	32 000
Algen	0	95
STICKSTOFFKREISLAUF		
Ammonifizierung	170 000	25 050 000
N-Fixierung aerob	15	816
N-Fixierung anaerob	0	350
Oxydation zu NO 2	280	9 518
Oxydation zu NO 3	130	4 510
SCHWEFELKREISLAUF		
Oxydation von S	172	2 505
Oxydation von H2S	750	1 500
Reduktion von SO4	4	11
Mineralisation	0	0
CHEMISMUS		
Ph vor Extraktion mit H20	10,4	9,4
Ph nach Extraktion mit H20	10,5	8,8
Unlöslicher Rückstand	5,75	73,41
HCl-Auszug Na	0,160	0,034
H20-Auszug Na	12,5	0,070
HCl-Auszug K	0,044	0,078
H20-Auszug K	0,061	0,206
HCl-Auszug Ca	17,16	0,72
H20-Auszug Ca	0,26	0,32
HCl-Auszug Mg	0,16	0,63
H20-Auszug Mg	0,06	0,00
HCl-Auszug Fe^{2}	0,20	0,62
H20-Auszug Fe^{2}	0,00	0,00
HCl-Auszug Fe^{3}	0,17	0,02
H20-Auszug Fe^{3}	0,00	0,00
H20-Auszug Cl	6,2	0,0
H20-Auszug NO3	2,1	0,14
H20-Auszug SO4	3,2	0,4
HCl-Auszug SO4	0,0	0,0
Volumetrie CO3	18,8	1,0

Nummer der Probe	88	89	90
Trocknungsverlust bei 110° C	4,2 %	3,7 %	4,7%
Gesamtmikroflora	312 000 000	124 400 000	+
Pilze	26 000	160 500	+
Aktinomyceten	11 400	770	+
Algen	100	46	+
STICKSTOFFKREISLAUF			
Ammonifizierung	67 000 000	25 920 000	+
N-Fixierung aerob	3 640	830	+
N-Fixierung anaerob	1 140	518	+
Oxydation zu NO 2	4 680	980	+
Oxydation zu NO 3	2 600	465	+
SCHWEFELKREISLAUF			
Oxydation von S	1 080	770	47 000
Oxydation von H2S	260	120	26 100
Reduktion von SO4	460	465	2 600
Mineralisation	600	770	4710
CHEMISMUS			
Ph vor Extraktion mit H2O			
Ph nach Extraktion mit H2O			
Unlöslicher Rückstand			
HCl-Auszug Na			
H2O-Auszug Na			
HCl-Auszug K			
H2O-Auszug K			
HCl-Auszug Ca			
H2O-Auszug Ca			
HCl-Auszug Mg			
H2O-Auszug Mg			
HCl-Auszug Fe			
H2O-Auszug Fe			
HCl-Auszug Fe			
H2O-Auszug Fe			
H2O-Auszug Cl			
H2O-Auszug NO3			
H2O-Auszug SO4			
HCl-Auszug SO4			
Volumetrie CO3			

LITERATURVERZEICHNIS

Arbeiten mit mikrobiologischer Fragestellung werden vor dem Autorennamen mit einem * gekennzeichnet.

ABELSON,P.H.: Organic Geochemistry.- Int.Ser. o. Monogr. on Earth Science,Bd.16,p.431-455,1963.

*ALEXANDROV,V.G.: Bactéries destructrices des Silicates.- Mikrobiologija,Bd.19,p.97-107,1949. (frz. Übers.).

ANONYM: Corrosion of Concrete Sewers.- S. African Counc. for Scientific a. Industrial Research,Pretoria,1959.

*BAARS,J.K.: Over Sulfatreductee door Bacterien.- Diss. Delft,1930.

*BAAS-BECKING,L.G.M.: Studies on the Sulfur Bacteria.- Ann. Bot. London,Bd.39,p.613,1925.

*BAAS-BECKING,L.G.M. a. KAPLAN,J.R.: Biological processes in the estuarine environment.- Proc. Konikl. Nederl. Akad. Met.C.p.86-96,1956.

BAAS-BECKING,L.G.M. et al.: Limits of the natural environment in terms of pH and Oxidation-Reduction Potentials.- J.Geol.,Bd.86,p.243-284,1960.

*BACHMANN,E.: Kalklösende Algen.- Ber.Deutsch. Bot. Ges.,Bd.33, p.45-57,1915.

*BACHMANN,E.: Die Beziehungen der Kieselflechten zu ihrer Unterlage.- Ber. Deutsch.Bot. Ges.,Bd.35,p.464-476,1917.

*BASSALIK,K.: Über Silikatzersetzung durch Bodenbakterien und Pilze.- Z.f.Gärungsphysiologie,Bd 2u.3,p.1-32 u.15-42 1912 u.1913.

*BAVENDAMM,W.: Die mikrobiologische Kalkfällung in der tropischen See.- Archiv f. Mikrobiologie,Bd.3,p.205-276,1932.

BEAR,F.E. Hrsg.: Chemistry of the Soil.- New York,1955.

*BEERSTECHER,E.: Petroleum Microbiology.- Elsevier New York,1954.

*BEIJERINCK,M.W.: Über Spirillum desulfuricans als Ursache der Sulfatreduktion.- Centralblatt f. Bakteriol., Abt.IIBd.1,1895.

*BEIJERINCK,M.W.: Zentralblatt f. Bakteriologie, Abt.II.Bd.11,1904

*BENDA,I.: Mikrobiologische Unters. über das Auftreten von H_2S in anaeroben Zonen des Hochmoors,Diss. Würzburg,1956.

*BERGGEY: s. unter BREED.

BEYER,O.:Alaun und Gips als Mineralneubildungen etc.-Z.d. geol. Gesellsch.,Bd 63,p.429,1911.

BILTZ,H. u. BILTZ,W.: Ausführung quantitativer Analysen.- Stuttgart,1960.

BLACKWELDER,E.: Exfoliation as a phase of rock-wheatnering.- J.o.Geology,Bd 30,p.1925.

BLACKWELDER,E.: The Insolation Hypoth.o. Rock-wheatnering.- Amer. J.o.Science,Bd.26,1933.

BLANCK,E.: Die ariden Denudationsformen und Verwitterungsformen der sachs. Schweiz als Folge organischer Verwitterungsformen im humiden Bereich.- Tharandter forstl. Jb., Bd.73, 1922.

BLANCK,E. u. GEIMANN,W.: Chem. Unters. über Verwitterungserscn. im Buntsdst. insbesondere über die Natur der im Gesteine wandernden Lösungen und deren Ausscheidungen.- Tharandter Fortsl. Jb.,Bd.75, p.31,1934.

BLANCK,E. und RIESER,A.: Über chem. Veränderungen des Granits unter Moorbedeckung.- Chemie der Erde,Bd.2, p.115,1926.

BLANCK,E. und RIESER,A.: Vergl. Unters. über die Verw. v. Gesteinen unter abweichenden klimatischen Verhältnissen.- Chemie der Erde,Bd.3,1928.

BLANCK, E.u.RIESER,A.: Über Verwitterungserscheinungen am Bremer Rathause.- Chemie der Erde,Bd.4, p.139,1930.

BLANCK,E.u.HALID EVLIA,: Ein Beitrag zur Frage nach der Herkunft der im Gestein und Boden zirkulierenden Sulfathaltigen Lösungen.- Chemie der Erde,Bd.7, 1932.

*BLÖCHLIGER,G.: Mikrobiologische Untersuchungen an verwitternden Schrattenkalkfelsen.- Diss. Zürich,1931.

*BLÖCHLIGER,G.: Kleinlebewesen und Gesteinsverwitterung.- Z. f. Geomorphologie,Bd 7,p.273,1932/33.

BLÜMEL,O.W. u.JUNG,F.: Untersuchungen über Zementausblühungen.- Betonsteinzeitung Bd.6u.7, 1962.

BOLTON,W.: Die Prüfung klastischer Gesteine auf ihre Verwitterbarkeit.- Dinglers Polytechnisches Journal,1893.

*BOURCART,J.NOETZLIN,J. u.POCHON,J.: Etude des détoriations des pierres de monuments historiques.- Ann. Inst. tech. Bat. et T.P., Bd 108,1949.

*BREED, R.S. et al. (Hrsg): BERGEY'S Manual of determinative Bacteriology.- Baltimore,1957.

BRINKMANN,R.,MÜNNICH,K.O. u.VOGEL,J.C.: Anwendung der C^{14}-methode auf Bodenbildung und Grundwasserkreislauf.- Geol. Rundschau,Bd.49, p.244-253,1960.

*BROMFIELD,S.M.: Reduction of ferric compounds by Soil bacteria.- J.gen.Microbiol.,Bd.11,p.1-6, 1954.

*BROMFIELD,S.M.: The Reduction of Iron by bacteria.- Journal of Soil Science,Bd.5,1954.

*BUNKER,H.J.: A review of the physiology and biochemistry of the sulfur bacteria.- Dep. Sci. industr. Res. Chem. Res. spec.Rep.,Bd 3, 1936.

*BUNKER,H.J.: Microbiological anaerobic corrosion.- Chem. a. Industr.,Bd 18,p.412, 1940.

*BUTLIN,K.R. a. ADAMS,M.E.: Autotropnic growth of sulfate reducing bacteria.- Nature London,Bd.160,p.154,1947.

*BUTLIN,K.R.: Some maladreous activities of sulpnate-reducing bacteria.- Proc. Soc. appl. Bact.,Bd.2 ,p.39, 1949.

*BUTLIN,K.R. a. POSTGATE,R.: Microbiological formation of

sulphide and sulfur.- Sympos.II Metabolisme Microbica Roma, p.126-142, 1953 a.

*BUTLIN,K.R.: The bacterial sulphur cycle.- Research, Bd.184, London,1953.

CARROL,D.: The role of clay minerals in the transportation of iron.- Geochim.et Cosmochim. Acta,Bd 14, p.1-27,1958.

CARROL,D.,STARKEY,H.C.: Leaching of clay minerals in a limestone environment.- Geochim. et Cosmochim. Acta,Bd.16, p.83-87,1959.

*CHALVIGNAC,M.A. Sur la determination de la microflore totale par extraits de terre.- Ann. Inst. Past.,Bd.91,p.602,1956.

CHARLOT,G. Colorimetric determination of elements.- Amsterdam, 1964.

CORRENS, C.W. u. ENGELHARDT,W.v.: Neue Untersuchungen über die Verwitterung an Feldspäten.- Chemie d. Erde, Bd.12,1939.

COTTE,J. KAHANE,E.: Sur une nouvelle méthode de reduction pour le dosage des nitrates.- Bull. Soc. Chim. France, p.542-544,1946.

DEGENS,E.T.: Geochemistry of Sediments.- New Jersey, 1965.

DELVERT,J.: Recherches sur l'érosion des grès des monuments d'Angkor.- Diss. Paris,1962.

*DREWES, K.: Über die Beteiligung von Mikroorganismen bei der Aufschliessung unlösl. Phosphate.- Zentralbl. f. Bakteriol. II. Abt.,Bd.76,1928-29.

DREXLER,F:Verwitterung von Dachschiefer.- Der Bautenschutz, Bd.10, p.116-118, 1931.

*DUCHE,J.: De la corrosion des matériaux- Rôle des microorganismes.- Pédobiologie, Gr. 1960. Appl.1,1960.

*DUFF,R.B. a. WEBLEY,D.M.: 2-ketogluconic acid as a natural chelator produced by soil bacteria.- Chem. a. Industry London,Bd.24,p. 1376, 1959.

*DUFF,R.B., WEBLEY,D.M. a. SCOTT,R.O.: Solubilization of minerals by 2-ketogluconic acid producing bacteria.- Soil Science, Bd.95,p.105-115, 1963.

*ENO,F.: Aspergillus niger and Biotitetc.- Soil Sci.,Bd.80,1955.

*ETTLINGER,L.: Die Bedeutung der Mikroorganismen für die Bodenfruchtbarkeit(mit Literatur angaben über Silikatbakterien). Schweizer landw. Forschung,Bd 3,p.231-251,1962.

EVANS,W.D.: The organic solubilization of minerals in Sediments.- Advances in organic geochemistry ,1964.

FISKE,C.M.: (Sulfatbestimmung) J. of biol. Chem.,Bd.47,p.59,1921.

FRANZEL,G.: Kleinverwitterungsskulpturen im südpfalzischen Sandstein.- N.Jahrbuch f. Geol. u. Pal.,Bd.1962,p.453,1962.

FREDERICKSON,A.F.: Mechanism of wheatnering.- Bull. Geol. Soc. Am.,Bd.62, p.221-232, 1951.

GEIGER,R.: The Climate near the ground.- Cambr.,Mass. Harvard

University Press, 1950.

GOLDICH,S.S.: A study in Rock-wneathering.- J.Geol.,Bd.46,1938.

GRÜN,R.: Verwitterung der Bausteine vom chem. Standpunkt.- Chemikerzeitung.,Jg.57,p.401,1933.

*GUNKEL,W. Die Verwendung des Ultra-Turrax zur Aufteilung von Bakterienaggregaten in marinen Proben.- Helgolander Meeresunters.,Bd.11,p.287-295,1964.

HABERLE,G.D.: Die Gitter-und netzförmige Verwitterung der Sandsteine.- Geol. Rundschau,Bd.6,1915.

HAHNEL,O.: Kohlendioxyd-und Schwefeldioxydgehalt der Berliner Luft.- Z. f. angew. Chemie,Bd.35,p.618,1922.

*HALVORSON,H.O. a. STARKEY,R.L.:Studies on the transformation of iron in nature.I.- J. of physical Chemistry,Bd.31,1927.

*HALVORSON,H.O., and STARKEY,R.L.: Studies on the transformation of iron in nature III.- Soil Science,Bd.32,p.141-165,1931

HANDBUCH der Bodenkehre: Berlin,1931 und Erganzungsband 1939.

*HAWKER,L.E. et al.: Einführung in die Biologie kroorganismen.- Thieme,Stuttgart,1962.

*HEINEN,W.:Arbeiten über Kieselsäurestoffwechsel.- Archiv für Mikrobiologie, Bd37 , 1960 - 1965.

*HENDERSON,M.E.K a. DUFF,R.B.: The release of metallic silica ions from minerals, rocks and soils by fungal activity.- The Journal o. Soil Sciance,Bd 14,p.236-246,1963.

HERRMANN,R.: Flammenphotometrie.- Springer ,Berlin,1956.

*HIRSCH,P.OVERREIN,L.,ALEXANDER,M.: Formation of Nitrite and Nitrate by Actinomycetes.- J.Bacteriol.,Bd 82,p.442-448, 1961.

HÖLLERMANN,P.: Verwitterungsrinden in den Alpen.- Z.f. Geomorphologie,Bd.7,p.172-177,1963.

HORMANN,H.: Denkmalpflege u. Gesteinsschutz in England.- Veröffentl. d. bayer. Staatsbauverw. München,1928.

*HOFMAN,T.,LEES,H.: Biochem. J. Bd.54 p.579,1953.

*IMSHENECKI,E.et al.: Mikrobiologija Bd.24 p.539, 1955.

*ISACENKO,V.Sur,la corrosion du béton.- Comptes Rendues (Doklady) Acad. Sci. USSR,Bd.II,p.287-289,1936.

*JAAG,O.: Untersuchungen über die Vegatation und Biologie der Algen des nackten Gesteins in den Alpen, Jura u. Schweiz. Mittelland.-Beitr. Kryptogamenfl. Schweiz,Bd.9 ,1945.

JARVINEN,J.K.: Z. analyt. Chemie,Bd.72,p.84-99,1927.

JAKOB,W.: Chemische Analyse der Gesteine etc.-Birkhäuser,Basel, 1952.

KAISER,E.: Verwitterungserscheinungen an Bausteinen.- Neues Jahrbuch f. Min.,Jg.100,p.42,1907.

KAISER,E.: Über edaphisch bedingte geol. Vorgänge und Erscheinungen.- Sitz.ber. bayr. Akad. d. Wiss., 1928.

KAISER,E.: Über eine Grundsatzfrage der naturlichen Verwitterung

der Bausteine im Vergleich zu denen in der freien Natur.- Chemie der Erde, Bd.4, p.290-343, 1930.

*KARAVAIKO, G.J.: Chemical and biological sulfur Oxidation at the laboratory.- Mikrobiologija (Transl.), Bd.31, p.267, 1961.

*KAUFFMANN, J.: Rôles des bactéries dans l'altération des pierres calcaires des monuments.- C.rendues de l'acad. de Sci., Bd.234, 1952.

*KAUFFMANN, J.: Rôle des bactéries dans l'altération des pierres des monuments.- Corr. et Anticorrosion, Bd.1, p. 33-41, 1953.

*KAUFFMANN, J. et TOUSSAINT, P.: Nouvelles expériences montrant le rôle des bactéries nitrifiantes etc.-Corr.et Anticorr., Bd.2, p.240-244, 1954.

*KAUFFMANN, J.: Corrosion et protection des pierres calcaires des monuments.- Corr. et Anticorr., Bd. 8p.87-95, 1960.

KESSLER, F.J.: Verwitterungserscheinungen an Bausteinen.- Diss. Würzburg, 1960.

KIESLINGER, A.: Krustenbildungen an Bausteinen.- Der Bautenschutz, Bd.1931, p.25-29 und Jg.1933 p.97-100, 1931 u.1933.

KIESLINGER, A.: Zerstörungen an Steinbauten.- Leipzig und Wien, 1932.

KIESLINGER, A.: Kristallisationsdruck, Quellung und Verwitterung.- Geol. und Bauwesen, Bd 5 p 1933.

KIESLINGER, A.: Brandschäden an Natursteinen.- Österr. Z. f. Denkmalspflege, Bd.2, p.49-58, 1948.

KIESLINGER, A.: Rahmenverwitterung.- Geologie und Bauwesen, Bd.24, p.171-186, 1959.

KLANDER, F.: Über im Buntsandstein wandernde Lösungen etc..- Chemie der Erde, Bd 2, 1926.

KNETSCH, G.: Beiträge zur Kenntnis von Krustenbildungen.- Z.d.d.Geol. Ges., Bd89, 1937.

KNETSCH, G.: Geologie am Kölner Dom.- Geol. Rdsch., Bd.40, p.57, 1952.

KNETSCH, G.: Über aride Verw. unter bes. Berücksichtigung naturl. u. künstl. Wande in Ägypten.- Z.f. Geomorphol., Suppl.bd.1, p.190-205, 1960.

KNETSCH, G.: Über Wüstenverw., Wustenfeinrelief und Denkmalzerfall in Ägypten.- N.Jb.Geol.Pal.Abh., Bd.101, p.277, 1955.

*KRASSILNIKOV, B.: Rôle des microorganismes dans l'érosion des differentes types de roches.- Mikrobiologija (russ.), Bd.20, p.90, 1951.

KRATZER, P.A. Das Stadtklima.- Braunschweig (Vieweg u. Sohn), 1956.

KRAUSKOPF, K.B. Dissolution and precipitation of silica at low temperature.- Geochim.Cosmochim.Acta, Bd.10, p.1, 1956.

KRUMBEIN, W.C. a. GARRELS, R.M.: Origin a. classification of chemical sediments in terms of pH and Redox potential.- J.Geol., Bd.60, p.1, 1952.

KRUMBEIN,W.E.: Geologische Kartierung des NW-quadranten des Gradabteilungsblattes Markt Einersheim,-Dipl.arbeit unveröff. Würzburg, 1963.

*KRUMBEIN,W.E.,POCHON,J.: Ecologie bactérienne des pierres altéres des monuments.-Ann.Inst.Past.Bd.107,p.724-732,1964.

*KRUMBEIN,W.E.,POCHON,J.,CHALVIGNAC,M.A.: Recherches biologiques sur le Mondmilch.- C.R.Acad.Sci.,Bd.258,p.5113,1964.

*KUNZE.: Über Säureausscheidungen von Pflanzen und Pilzen u. ihre Bedeutung etc..- Jb. wiss. Botanik Bd.42, p.383,1906

*KUZNETSOV,S.J. et al.: Introduction to geological Microbiology.- Mc Graw Hill, New York,1963.

*LAJUDIE,J.;THIEBAUD,M.: Association bactériennes etc.:Ann. Inst. Past. Bd. 105 p.353-358,1963.

*LECLAIRE,S,.MANIL,P.: Extraction, par voie biologique du fer libre dans le Sol.- Archive international de physiologie, Bd.LXI p.263,1953.

LECLERC,E.: Agressivité des eaux.- Corr. et Anticorr.,Bd.8,1960.

*LEFEVRE,M.,POCHON,J.,LAPORTE,G.,CHALVIGNAC,M.: Sur la decontamination bactérienne et algale de la grotte de Lascaux.- C.R. Acad.Sci,Paris, Bd.,258,p.6576, 1964.

LENTSCHING-SOMMER,S.: Über die wabenförmige Verwitterung des Elbsandsteines.- Jb. staatl. Mus. f. Min. u. Geol.,1961.

LINCK,G.: Die Schutzrinden.- Handbuch der Bodenlehre,Bd.III p.490-505, 1930-

*LINDBLOM,G.P. LUPTON,M.D.: Microbial aspects of organic Geochemistry .- Dev. in Industr. Microbiology,Bd 2,p.9,1961.

*LINCKE,F.,de RUDDER,B.:Biologie der Großsstadt.- Leipzig,1940.

*LOCHHEAD,A.G.: The nitrifying bacteria.- Ann. Rev. Microbiol., Bd.6,p.185, 1952.

LOUDEN,R.L.: Zur Chemofazies der Schaumkalkbänke im Unteren Muschelkalk.- Diss. Würzburg,1963.

MANDL,J.,GRAUER,A.,NEUBERG,C.: Solubilization of insoluble matter in nature.- Biochim. Biophys.Acta,Bd 8,p.654,1952 und Bd.10,p.540-569, 1953.

MARTELL,A.E.,CALVIN,M.: Chemistry of metal chelate compounds.- Prentice Hall, New York, 1952.

MEHLIG,J.P. u. HULETT,H.R.: Ind.Eng.Chem. Anal. Ed.Bd.14,p.862, 1942.

*MEKHTIEVA,V.L.,FRIDMAN,A.J.: Results of a microbial study of rocks and underground waters in the region of the Urup copper deposits.- Mikrobiologija (Transl.),Bd.5, p.946-951,1960.

MERCK: Komplexometrische Bestimmungsmethoden.- 3. Aufl. Darmst.

MERILL,G.P.: Rocks, rockwheathering and Soils.- London,1921.

MILLER,L.KAHN,J.S.: Statistical analysis in the geological sciences.- New York,1962.

MORTENSEN,H.: Die Salzsprengung u. ihre Bedeutung.- Petermanns Mitt. Geogr. Reine, 1933.

MORTENSEN,H.: Über Wabenverwitterung und Hangabtragung im semiariden und vollariden Gebiet.-Congr. internat. de Geographie,Rio de Janeiro,1956.

*MÜLLER,G.,FÖRSTER,I.: Zum Problem der Nährstoffreisetzung aus Mineralen durch Bodenpilze.- Zentralbl. f. Bakteriol., II,Bd.114,p.1,1961 u. Bd.116,1963.

*NEHER,J.u.ROHRER,E.:Bakterien in tiefergelegenen Gesteinslagen.- Eclogiae Helveticae,Bd.52,p.619-625, 1959.

*NIKITIN,D.J.: Die Rolle der Mikroorganismen bei der Auflösung schwerlösl. Ca-verbindungen im Boden.- Nachr. d. Akad. d. Wiss. USSR biolog. Sekt.,Bd.24,p.2276,1959.

*OBERLIES,F.,POHLMANN,G.: Über die Einwirkungen von Mikroorganismen auf Ton, Feldspat und Kaolin.- Abh. Intern. VI. Keram. Kongress, 1964.

OBERLIES,F.u.POHLMANN,G.: Einwirkung von Mikroorganismen auf Glas.-Naturwiss.,Bd.45,p.487,1958.

OBERLIES,F.u.POHLMANN,G.: Veränderungen von Feldspatoberflächen durch Mikroorganismen.- Naturwiss.,45,p.513,1958.

OFFE,H.: Städtehygiene u. Mikroklima.- G.Ing.,Bd.65,p.248-551, 1943.

*OPPENHEIMER,C.H.: Bacterial activity in sediments of shallow marine bays.- Geochim.Cosmochim. Acta,Bd.19,p.244-260,1960.

*OPPENHEIMER,C.H. a.MASTER,I.M.: Transition of silicate and carbonate crystal structure by Photosyntnesis and metabolism.- Geol. Soc. Am. Abstracts,Bd.74,p.125, 1963.

*PAINE,S.etal.: Phil. Trans. of the Roy.Soc. London,Bd.222,1933.

*PARKER,C.D.: The corrosion of concrete.- Aust. Journ. exp. biol. med. Sci.,Bd.23,p.91,1945a.

*PARKER,C.D.:Species of sulfur bacterium associated with the corrosion of concrete.- Nature London,Bd.159, p.437,1947.

PARKER,C.D., PRISK,J.: The oxidation of inorganic compounds by var. sulphur bacteria.-J.gen. Microbiol.,Bd.8,p.344,1953.

*POCHON,J.,COPPIER,O.: Rôle des bactéries sulfato-reductrices dans l'altération biologique des pierres de monuments.- C.rendues de l'acad. de Sci.,Bd 231, 1950.

*POCHON,J.,COPPIER,O.,TSCHAN,Y.T.: Role des bacteries dans certains alterations des pierres de monuments.- Chim. et. Ind.,Bd.65,p.496, 1951.

*POCHON,J. DE BARJAC,H.: Traité de Microbiologie du Sol.- Paris, Dunod, 1958.

*POCHON,J.TARDIEUX,P.LAJUDIE,J.CHARPENTIER,M.: Interaction bacterienne dans la degradation des temples d'Angkor.- C.R. de l'Acad. de Sci.,Bd 248,p.3644,1959.

*POCHON,J.et al.: Degradations des temples d'Angkor et processus biologiques.- Ann. Inst. Past.,Bd.98,p.457-461, 1960.

*POCHON,J.: Alteration bacteriennes des pierres des monuments.-

Bull. de liaison de l'Ass. des Anc. Eleves et Dipl. de l'Inst. Past., Bd 12, p.1-4, 1962.

*POCHON, J., CHALVIGNAC, M.A., KRUMBEIN, W.E.: Recherches biologiques sur le Mondmilch.- C.R.Acad. de Sci., Bd. 258, p.5113, 1964.

*POCHON, J.CHALVIGNAC, M.A.: Oxidation biologique du soufre et dégradation des sols de vignoble.- V.Symposio Internat. di Agrochim. su la"Zolfo in agricoltora", p.373, 1964.

*POCHON, J., TARDIEUX, P.: Techniques d'Analyse en microbiologie du Sol.- Ed. la Tourelle St. Mande Seine, 1964.

POLLACK, V.: Zur Verwitterung d. Rauchgase und Schlagregen.- M.Z., Bd.34, p.298, 1917.

POLLACK, V.: Verwitterung in der Natur und an Bausteinen.- Wien, 1925.

*POSTGATE, J.R.: The reduction of sulfur compounds by desulfovibrio desulfuricans.- J.gen. Microbiol., Bd.5, p.725, 1951.

QUERVAIN, F.DE, JENNY, V.: Verhalten der Bausteine gegen Verwitterungseinflüsse.- Beitr. z. Geol. d. Schweiz, geotech. Ser., 30. Lieferung (siene auch 23. Lieferung), 1931.

QUERVAIN, F.De: Über Verwitterungsersch. an Bausteinen.- Hoch u. Tiefbau. Schweiz. Baumeisterz., Bd 10, 1938

RICKE, W.: Ein Beitrag zur Geochemie des Schwefels.- Geochim. Cosmochim. Acta, Bd.21, p.35-80, 1961.

*RIPPEL, A.: Über Schwefelsaure erzeugende Bakterien und Umsatz von Schwefel im Boden .- Handb. der Bodenk. Bd.VII, 1931.

*RIPPEL, A.: Zur Kenntnis des Schwefelkreislaufs im Erdboden.- Journal f. Landwirtschaft, Bd. 76, p.7 , 1928.

*RIPPEL-BALDES, A.: Grundriß der Mikrobiologie.- 1952.

*RIPPEL-BALDES, A., CLAUS, D., WITTMANN, H.: Untersuchungen über die Zusammensetzung von Bakterienschleimen und deren Lösungsvermögen gegenüber schwerlösl. anorg. Verbindungen.- Archiv f. Mikrobiol., Bd.29, p.169-178, 1958.

*ROUGIEUX, R.: Au sujet de la preparation de l'extrait de terre.- Biologie du Sol , Heft 3, p.9, 1965.

RUTTE, E.: Kalkkrusten in Spanien.- N.Jb. Geol. Pal. Abh., Bd.106, 1958.

*RYZHOVA, V.N., IVANOV, M.V.: Utilization of dispersed organic matter of sedimentary rocks for sulfate-reduction.- Mikrobiologija (Transl.), Bd.30, p.1075-1079, 1961.

*SCHEFFER, F. et al. Biologische Ursachen der Wüstenlackbildung.- Z.f.Geomorph., Bd.7, p.112-119, 1963.

SCHMÖLE, R.: Der Baumberger Sandstein und seine Verwitterung.- Diss. Münster, 1926.

SCHMÖLZER, A.: Zur Entstehung der Verwitterungsskulpturen an Bausteinen.- Chemie d. Erde, Bd. 10, p.479, 1936.

*SCHWARTZ, W., MÜLLER, A.: Geomikrobiologie: Stand und Entwicklung eines neuen Forschungsgebietes.- Erdöl u. Kohle, Bd.9, 1953.

*SCHWARTZ,W.u.MÜLLER,A.: Methoden der Geomikrobiologie.- Freiberger Forschungshefte,Bd. C48,1958.

*SCHWARZBACH,M.: Über edaphisch bedingte Wüsten.- Z.f. Geomorphologie,Bd.8,p.440,1964.

SEGALEN,P.: Le fer dans les Sols.- ORSTOM,Paris,1964.

*SOKOLOVA,G.A. u.KARAVAIKO,G.I.: Biogenic oxidation of sulfur in Rozdole ore in Laboratory conditions.- Mikrobiologija (Transl.),Bd.31,p.984-989,1962.

*STARKEY,R.L.: Relations of microorganisms to transformation of sulfur in soils.- Soil Science,Bd.70,p.55,1950.

*STARKEY,R.L.u.HALVORSON,H.O.: Studies on the transformation of iron in nature.- Soil Science,Bd.24,p.381,1927.

*STARKEY,R.L. et al.: On the mineralisation of sulfur.- Atti del VI° Cog. internaz.Mikrobiolog.Rom,Bd.1,p.256,1953.

TAMM,O.: Experimentelle Studien über die Verwitterung und Tonbildung von Feldspäten.- Chemie d. Erde,Bd.4,p.420,1930.

*TAYLOR,C.B. u. HUTCHINSON,G.H.: Corrosion of concrete caused by sulphur oxidizing bacteria.- J.Soc. chem.Ind. London, Bd.66,p.54,1947.

*TCHAN,Y.T.: Technique nouvelle pour l'etude des bacteries oxydant les hyposulfites dans le sol.- Ann.Inst.Past., Bd.73,p.74,1947.

*VERONA,O.: A propos de la solubilisation bacterienne du carbonate de Fer.-Est. d. Bol. della Sez.Ital. de la Soc.int. de microbiol.,Fasz.VI,1930.

VOGEL,J.C.: Über den Isotopengehalt des Kohlenstoffs in Süßwasserkalkablagerungen.- Geochim.Cosmochim.Acta,Bd.16,1959.

*WAKSMAN,S.A.u.JOFFE,J.S.: The chemistry of the oxidation of sulfur by microorganismsetc..- J.of Biol.Chem.,Bd.50,1922.

*WEBLEY,D.M.,HENDERSON,M.C.K.u.TAYLOR,J.F.:The microbiology of rocks and wheathered stones.- The J.of Soil Sci,Bd.14, p.102-112, 1963.

*WEBLEY,D.M.,DUFF,R.B.u.MITCHELL,W.A.: Nature,Bd.188,p.766,1960.

WELTE,D.H.: Sedimentologische Unters. uranh. Keupersdst. aus der Umgebung von Lichtenfels u. Coburg.- Diss.Würzburg,1959.

WEYL,P.K.: The change in solubility of calcium carbonate with temperatur and CO_2content.- Geochim.Cosmochim.Acta,17,1959.

WILHELMY,H.:Hohlblockbildungen (Tafoni) im semiariden und voll-ariden Klima.- internat.Congr. de Geogr.Rio de Jan.p.425,59.

WILHELMY,H.: Klimamorphologie der Massengesteine.- Westermann Braunschweig, 1958.

*ZO BELL: Ecology of sulfate-reducing bacteria.- Producers montnley,Bd.22,p.12-29,1958.

ZOLLNER,P.:Der Grünsandstein von Soest u. seine Verwitterung.- Zs. f. prakt. Geol.,Bd.35,p.7-13,1927.

Die vorliegende Arbeit ist Teil eines Forschungsprogramms des Geologischen Institutes, das mit Mitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft durchgeführt wird.
Die Absicht einer mikrobiologischen Untersuchung von Bausteinen in Würzburg und Unterfranken führte dazu, daß ich ein Jahr in der Bodenmikrobiologischen Sektion des Institut Pasteur in Paris und dem Institut für Mikrobiologie der Landwirtschaftlichen Hochschule in Wageningen die bodenmikrobiologische Methodik unter besonderer Berücksichtigung von Gesteinen und Sedimenten studierte.
Herrn Professor Dr. J POCHON vom Institut Pasteur gebührt mein besonderer Dank für die Einführung in das Gebiet.
Bei meinen Arbeiten in Würzburg wurde ich in großzügiger Weise durch Schaffung von Arbeitsmöglichkeiten und zahlreiche Hinweise und Anregungen durch Herrn Professor Dr. G.KNETSCH gefördert.
Herrn Professor Dr. H. SEELIGER und seinen Mitarbeitern, sowie Herrn Regierungsmedizinaldirektor Dr. W. SCHMID und den Mitarbeitern der Staatlichen Bakteriologischen Untersuchungsanstalt danke ich für wertvolle Anregungen und Arbeitsmöglichkeiten.
Herrn Dr. A. PRASHNOWSKI und Herrn Dr. D. WELTE gebührt mein Dank für wertvolle Hilfe und Diskussionsbeiträge zum geochemischen Teil der Untersuchungen.
Die Untersuchungen wurden im Zeitraum von Oktober 1964 bis Juli 1966 durchgeführt.

Lebenslauf

Am 14.3.1937 wurde ich als Sohn des Dipl.-Ing Karl Krumbein und seiner Ehefrau Carmen, geb. Rodenacker in München geboren.
Von September 1943 bis April 1948 besuchte ich die Volksschule in Holzminden.
Von April 1948 bis März 1957 besuchte ich das Neusprachliche Gymnasium des " Landschulheim am Solling " bei Holzminden.
Am 13.3.1957 legte ich dort die Reifeprüfung ab.
Von Wintersemester 1957/58 bis Sommersemester 1960 studierte ich an der Universität München das Fach Geologie. Dort legte ich am 29. Juli 1960 die Diplomgeologen-Vorprüfung ab.
Von Wintersemester 1960/61 bis Wintersemester 1962/63 studierte ich an der Universität Würzburg das Fach Geologie und legte dort am 22.2. 1963 die Diplomhauptprüfung für Geologen ab.
Das Thema der Diplomarbeit lautete: "Geologische Kartierung mit Erläuterungen auf dem NW-Quadranten des Gradabteilungsblattes Markt Einersheim".
Vom 15.5. 1961 bis 14.5.1962 war ich als Hochschulreferent Mitglied des Allgemeinen Studentenausschusses. Vom 14.5. 1962 bis 13.5.1963 war ich Mitglied des Ältestenrates.
Im April 1963 wurde ich in die Studienstiftung des Deutschen Volkes aufgenommen.
Im September und Oktober 1963 folgte ich einem ganztägigen Hochschulkurs für Bodenmikrobiologie am Institut Pasteur in Paris.
Von Oktober 1963 bis April 1964 arbeitete ich als Praktikand im Service de Microbiologie du Sol des Institut Pasteur. Im Mai und Juni 1964 arbeitete ich als Praktikand im Institut für Mikrobiologie der Landwirtschaftlichen Hochschule in Wageningen, Holland.

Am 18.9.1964 verheiratete ich mich mit Christiane Schönborn, Tochter des Regierungsbaumeisters i.R. Heinrich Schönborn.
Im Wintersemester 1964/65 nahm ich an einem halbtägigen biochemischen Praktikum teil.
Ich habe mich an keiner anderen Fakultät um den Doktorgrad beworben.

Würzburg, den 10.Oktober 1966